

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2017

Bc. Štěpán Odstrčil



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÁ ANALÝZA
OBJEMOVÝCH ZMĚN JEMNOZRNNÝCH BETONŮ**

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE VOLUME CHANGES OF FINE-
GRAINED CONCRETES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpán Odstrčil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. BARBARA KUCHARCZYKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Štěpán Odstrčil
Název	Experimentální a numerická analýza objemových změn jemnozrnných betonů
Vedoucí práce	Ing. Barbara Kucharczyková, Ph.D.
Vedoucí-specialista	prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] NEVILLE, A.M. Properties of Concrete. 2011. 5 th Edition. ISBN 978-0-273-755-807.
- [2] AÏTCIN, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton, Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [3] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [4] BAŽANT, Z. P., F.-J. ULM, H. JENNINGS, R. PELLENQ. Mechanics and physics of creep, shrinkage, and durability of concrete: tribute to Zdenek P. Bažant : proceedings of the Ninth International Conference on Creep, Shrinkage, and Durability Mechanics (CONCREEP-9), September 22-25, 2013 Cambridge, Massachusetts. ISBN 978-0-7844-1311-1.
- [5] HASSOUN, M. Nadim a A. A. AL-MANASEER. Structural concrete: theory and design. Sixth edition. USA: Wiley, 2015. ISBN 9781118767818.
- [6] BAJZA, A.; ROUSEKOVÁ, I. Technológia betónu. JAGA, Bratislava, 2006, ISBN 80-8076-032-2.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce se zabývá vyhodnocením experimentů zaměřených na stanovení vývoje objemových změn (smršťování/nabývání) jemnozrnných betonů v průběhu jejich zrání. Cílem je vyhodnocení provedených laboratorních měření a využití experimentálně získaných dat pro vytvoření numerického modelu řešené problematiky. Práce bude obsahovat část teoretickou a experimentální. V teoretické části bude zpracována podrobná rešerše zadané problematiky. Experimentální část bude obsahovat popis a vyhodnocení provedených měření, včetně numerické analýzy. Samotný experiment bude koncipován tak, aby v průběhu celého měření byly souběžně zaznamenávány délkové a hmotnostní změny zkušebních těles uložených v předepsaných podmínkách ošetřování. Po celou dobu měření bude zaznamenávána teplota a relativní vlhkost okolního prostředí, přičemž v prvních 72 hodinách zrání betonů bude měřena také teplota uvnitř zkušebních těles. Výsledky měření budou zpracovány ve formě tabulek a grafů. Experimentálně získaná data budou dále zpracována pro účely numerické analýzy. Numerická analýza bude řešena pod vedením specialisty z Ústavu stavební mechaniky. V závěru práce bude provedeno podrobné zhodnocení výsledků experimentů a numerických analýz.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).


Ing. Barbara Kucharczyková, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá experimentální a numerickou analýzou objemových změn jemnozrnných betonů. Byly provedeny experimenty zaměřené na stanovení objemových změn betonů, kde se měřily jak podélné změny délky, tak hmotnostní úbytky a teploty zkušebních těles z jemnozrnného betonu. Měření bylo rozděleno do dvou fází, první fáze měření trvala 72 hodin. Druhá fáze bude ukončena po ustálení hmotnostních úbytků a deformací. V rámci diplomové práce byla podrobně zpracována první fáze měření, a to jak z hlediska vyhodnocení experimentu, tak z hlediska numerické analýzy. Navíc byl vytvořen program v jazyce C# .NET, který slouží pro jednodušší zpracování surových naměřených dat z měřicí ústředny. Nakonec byl proveden porovnávací výpočet dle modelu B4, kde se výsledek výpočtu porovnal s výsledky experimentu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Objemové změny, smršťování, nabývání, experimentální analýza, model B4, jemnozrnný beton, numerická analýza, C# .NET, teplota, teplotní roztažnost.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the experimental and numerical analysis of volume changes of fine-grained concrete. Experiments were carried out, measuring both the length changes as well as the mass losses and the internal temperature of the test specimens made from fine-grained concrete. The measurements were divided into two parts (phases). The first phase took approx. 72 hours. The second phase was focused on the long-term measurements and will be completed after stabilization of the mass losses and length changes. In the diploma thesis, the first phase of measurement was elaborated in detail, both in terms of experimental and numerical analysis. In addition, a C # .NET program was created to facilitate the processing of raw measurement data from the data logger. Finally, a comparative calculation was performed according to the model B4, where the result of the calculation was compared with the results of the experiment.

KEYWORDS

Volume changes, shrinkage, swelling, experimental analysis, model B4, fine-grained concrete, numerical analysis, C# .NET, temperature, thermal expansion.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Štěpán Odstrčil *Experimentální a numerická analýza objemových změn jemnozrnných betonů*. Brno, 2017. 88 s., 7 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Barbara Kucharczyková, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9. 7. 2017

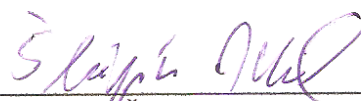

Bc. Štěpán Odstrčil
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 9. 7. 2017



Bc. Štěpán Odstrčil
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomohli na cestě k této diplomové práci, a to jak spolužákům při pomoci v nesnázích, při vypracovávání projektů potřebných k zápočtům, popřípadě pomoci s přípravou na zkoušky, tak všem mým přátelům. Dále všem z Ústavu stavebního zkušebnictví, jelikož celý ústav své hodiny vedl velmi prakticky a poučně, a to určitě napomohlo zvolit si tento obor. Dále bych chtěl poděkovat mé vedoucí diplomové práce, paní Ing. Barbaře Kucharczykové, Ph.D. za odbornou pomoc, vedení, ochotu a cenné rady při vypracovávání této práce. Dále panu prof. Ing. Zbyňku Keršnerovi, CSc., za jeho vstřícnost, dobrou náladu a cenné rady před psaním diplomové práce a v průběhu měření experimentů. Dále bych rád poděkoval mému oponentovi doc. Ing. Petru Frantíkovi, Ph.D. za jeho rady při psaní programu na zpracování dat, návrhy a jeho zájem o danou problematiku. Nakonec svým rodičům, za vstřícnost a pomoc při veškerém mém studiu zde, na Fakultě stavební. Výsledky prezentované v diplomové práci byly získány v rámci řešení projektu GA17-14302S „Experimentální analýza objemových změn cementových kompozitů v raném stádiu tuhnutí“, financovaného Grantovou agenturou ČR.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíle.....	2
3	Teoretická část	3
3.1	Smršťování	3
3.1.1	Plastické smršťování.....	4
3.1.2	Chemické smršťování	4
3.1.3	Autogenní smršťování	4
3.1.4	Smršťování vysycháním/odpařováním	6
3.1.5	Smrštění způsobené karbonatací.....	6
3.2	Projevy smršťování	6
3.2.1	Volné smršťování.....	7
3.2.2	Vázané smršťování	7
3.2.3	Příznivé účinky smršťování betonu	9
3.2.4	Nepříznivé účinky smršťování betonu.....	9
3.3	Děje probíhající v prvních 72 hodinách	10
3.3.1	Hydratační reakce	10
3.3.2	Vývoj tlakové pevnosti betonu během zrání.....	12
3.3.3	Trhliny a tah.....	12
3.4	Smršťování dle normy ČSN EN 1992-1-1	14
3.4.1	Celkové poměrné smršťování	14
3.4.2	Závěr	16
3.5	Model B4.....	16
3.5.1	Stručný popis	16
3.5.2	Závěr	20
3.6	Měření smršťování	20
3.6.1	Strunové tenzometry	22

3.6.2	Optická vlákna s Braggovou mřížkou	23
3.6.3	Elektrické tenzometry – odporové, piezorezistivní, kapacitní.....	23
3.6.4	Přenosný deformetr	24
3.6.5	Smršťovací žlab	24
3.6.6	Ohýbací žlab	25
3.6.7	Metoda vlnovce.....	26
3.6.8	Zařízení pro měření ztvrdlých trámů a válců	26
3.6.9	Smršťovací prstenec.....	27
3.6.10	Cure Reference Method (CRM).....	28
3.6.11	Digitální fotogrammetrie.....	28
3.6.12	Fotogrammetrická mikroskopie	29
3.6.13	Smršťovací kužel	30
3.6.14	Měření tenkovrstvých vzorků	30
3.6.15	Tazawova metoda.....	31
4	Experimentální část.....	32
4.1	Provedení experimentálního měření	32
4.1.1	Čerstvý beton	33
4.1.2	Plnění měřicích žlabů.....	35
4.1.3	Umístění žlabů na váhový stůl a laboratoř.....	39
4.1.4	Měření po 72 hodinách	42
4.1.5	Úskalí měření a experimentů	46
4.2	Naměřená data.....	49
4.3	Základní zpracování dat	49
4.3.1	Program pro zpracování dat	50
4.4	Vyhodnocení dat	59
4.4.1	Základní naměřená data	59
4.4.2	Vyhodnocení dat	62
4.4.3	Další postup řešení.....	65

4.5	Porovnání experimentu s modelem B4	67
4.5.1	Vstupní data	67
4.5.2	Výpočet	68
4.5.3	Závěr výpočtu B4.....	72
5	Závěr	73
6	Zdroje.....	75
7	Seznam obrázků	77
8	Seznam tabulek	80
9	Seznam rovnic.....	81
10	Přílohy.....	82
10.1	Všechny žlaby	82
10.2	Velký žlab 2.....	82
10.3	Velký žlab 3.....	84
10.4	Malé žlaby	86

1 ÚVOD

Beton, jakožto jeden z nejpoužívanějších stavebních materiálů hraje roli v našem každodenním životě, aniž bychom si to uvědomovali. Je proto důležité o něm vědět prakticky vše, co potřebujeme pro správný návrh jeho složení a zpracování, návrh samotné konstrukce, a to jak z hlediska její únosnosti, tak i z hlediska životnosti, aby výsledné dílo vyhovovalo našim potřebám.

Z těchto důvodů je nutné beton zkoumat ze všech možných úhlů. Jak z pohledu technologie jeho výroby, která řeší návrh složení, zpracování a děje odehrávající se ve vnitřní struktuře betonu zejména v raném stáří, tak z pohledu stavební mechaniky, která se zabývá silovými účinky působícími na konstrukci v průběhu její životnosti, návaznostmi jednotlivých prvků a celkovou interakcí betonové konstrukce s okolím.

Všechny tyto části jsou velmi důležité a v této práci se zabývám hlavně tou první fází, namíchání samotného betonu, jeho smršťování či nabývání a jejich účinky na konstrukci. Aby se dalo smršťování betonu řádně vypočítat pro návrh konstrukce, musí se nejdříve měřit laboratorně. Zjistit co se děje během tohoto procesu a jak tento děj ovlivňují různé přísady a příměsi, které jsou přidány do betonu.

Měření tohoto fenoménu má mnoho podob a je potřeba řádně uvážit, které z mnohých postupů se nejvíce hodí pro náš cíl. Jaké jsou výhody a nevýhody každého jednotlivého postupu. Neovlivňujeme nějakou část smršťování nějakým nedopatřením, popř. špatnou metodikou? Dá se náš experiment zopakovat a povede za stejných podmínek ke stejným výsledkům? Jsou odstraněny všechny složky lidského zásahu do procesu, aby výsledky byly skutečně vědecké, opakovatelné a objektivní? Toto jsou alespoň základní otázky, které si musíme klást a které bychom měli řešit. Jinak by se mohlo stát, že experimenty nebudou průkazné a jejich hodnota bude v podstatě nulová.

V této práci bych rád popsal základní informace o smršťování, co to je, čím se vyznačuje a jaké jsou jeho projevy. Dále shrnul všechny možnosti a způsoby měření této materiálové charakteristiky, včetně stručného shrnutí výhod, nevýhod a možnosti použití jednotlivých postupů. V neposlední řadě bych rád uvedl některé z matematických modelů sloužících pro predikci vývoje smrštění v betonu. Modely, které se používají v současné stavební praxi, se však nemusí vždy shodovat s reálným chováním betonu během jeho zrání. Proto bude v rámci práce také provedeno vzájemné porovnání experimentálního měření s vybranými teoretickými modely, případně navrženo upřesnění stávajících modelů.

2 CÍLE

Cílem této diplomové práce je měření smršťování jemnozrnných betonů, vyhodnocení experimentů a numerické zpracování naměřených dat. Vyhodnocení těchto výsledků bude použito pro porovnání se stávajícími matematickými modely, které se zabývají smršťováním. Mezi nejnovější a nejvíce komplexní modely pro predikci smršťování se řadí model B4 (autoři: Mija H. Hubler, Roman Wendner, Zdeněk P. Bažant), kterému bude v této práci věnována větší pozornost, mezi jinými bude také provedeno porovnání tohoto matematického modelu a experimentálně naměřených dat [1].

Součástí diplomové práce je také aktivní účast při samotném míchání čerstvého betonu a výrobě zkušebních prvků. Jejich vyjmutí z měřících forem a poté zahájení navazujícího dlouhodobého měření v laboratoři pomocí přenosného tenzometru.

Celé experimenty probíhají ve spolupráci s ústavem stavební mechaniky pod vedením doc. Ing. Petra Frantíka, Ph.D., který se stejnou problematikou zabývá a bude nápomocen při měření a vyhodnocování experimentů. S rannou spoluprací a konzultacemi bude vypomáhat prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.

3 TEORETICKÁ ČÁST

Zrání betonu je jev, za jehož počátek lze považovat okamžik uložení betonu do formy či bednění, a proto je nutné měřit a sledovat jeho chování, již v prvních hodinách zrání. V tomto období dochází ke složitým chemickým reakcím cementu a vody, zvaných jako hydratace cementu. Beton je ve své ranné fázi velmi dobře zpracovatelný, což je jedna z jeho nesporných výhod, díky které je používán hojně v dnešních stavbách [2].

A je to právě ta hydratace, která způsobuje objemové změny betonu, které chceme zkoumat a předvídat. Pro co nejúčinnější a nejpresnější předpověď a simulaci těchto změn je důležité o hydratačních procesech vědět co nejvíce. Během zrání betonu dochází ke změnám – jak fyzikálních, tak mechanických charakteristik, které mají dopad na vlastnosti ztvrdlého betonu. V ranné fázi zrání betonu, obzvlášť pokud je mu bráněno se volně deformovat, vznikají v něm tahová či tlaková vynucená napětí, která mohou následně vést ke vzniku trhlin [3].

Měření a vyhodnocování vlastností betonu včetně jeho smršťování je úkol pro stavební zkušebnictví, které se tímto problémem zabývá. V praxi existuje mnoho postupů, jak smršťování měřit a vyhodnocovat. Tyto jsou popsány konkrétněji v kapitole 4.

3.1 SMRŠŤOVÁNÍ

Smršťování je absolutně nevyhnutelný jev, který se objevuje v podstatě u všech typů betonu. Jeho, proces, účinky a následky můžeme sice omezit, ale vyhnout se mu nedá. Negativním projevem smrštění jsou trhliny, a proto věnujeme větší pozornost hlavně jejich vzniku a způsobům jejich omezení. Obecná definice smršťování by se dala vyjádřit slovy, že smršťování je proces, kdy za určitý časový úsek dojde ke kontrakci betonu. Samotné smrštění je hodnota této kontrakce. V některých případech dochází v raném stádiu betonu k jeho nabývání. Tento časový úsek je zpravidla relativně krátký a přechází plynule do smršťování, které u betonu očekáváme spíše [3].

Smršťování/nabývání betonu (nebo nějakého jiného materiálu) lze vyjádřit jako závislost změny délky vzorku/prvku na čase, která může být buď kladná, nebo záporná.

Během ukládání betonu do formy či bednění obsahuje běžný beton více vody, než je nutné k celkové hydrataci cementu. Toto je zapříčiněno požadavky pro zpracovatelnost betonu v jeho plastickém stavu. Proces smršťování má pak dvě složky. Zprvke dochází ke smršťování z důvodu ztráty přebytečné vody, která je v něm obsažena. Za druhé z důvodu

obecného průběhu hydratační reakce. Jsou zde i další složky, které toto ovlivňují, jako například karbonatační reakce [3].

Jedna z možností, jak omezit smršťování je řádné ošetřování betonu. Ošetřování betonu je také nezbytné pro dosažení co nejvyššího stupně hydratace cementu a získání co nejvyšší pevnosti a nejnížší permeability betonu. Neošetřovaný beton rychleji vysychá. Rychlost vysychání závisí na konkrétním vodním součiniteli. Jako následek neošetřování není dosaženo v betonu jeho pevnostního a trvanlivostního potenciálu. Obecně lze říci, že včasné ošetřování je lepší než pozdější a pozdní ošetřování lepší než vůbec žádné [4].

Pro pochopení jednotlivých druhů smrštění, je třeba nejdříve pochopit hydratační reakce, jejich fyzikální, termodynamické a mechanické důsledky. Je tu totiž fakt, že pokud je beton ponořen do vody, nedochází k jeho smršťování. Tím pádem není smršťování nevyhnutelným jevem jako takovým, ale pouze důsledkem absence adekvátního ošetřování nebo jeho přerušením [4].

3.1.1 Plastické smršťování

Plastické smršťování je občas nazýváno též jako kapilární smršťování. Nastává ještě v plastickém stavu betonu. Jeho příčinou jsou kontrakce v čerstvém betonu způsobené časnou ztrátou vody, odpařováním vody z povrchu betonu, který ještě nezačal tuhnout nebo už probíhá tuhnutí, avšak beton je stále v plastickém stavu. Velikost tohoto smrštění závisí na množství odpařené vody z povrchu a je tím pádem závislý na klimatických podmínkách, vodním součiniteli, ochraně betonu před klimatickými vlivy a stabilitě betonu [5].

Obecně se při vhodném návrhu složení betonu, kvalitně provedeném ztuhnutí čerstvého betonu v bednění a pečlivém ošetřování eliminuje plastické smršťování [3].

3.1.2 Chemické smršťování

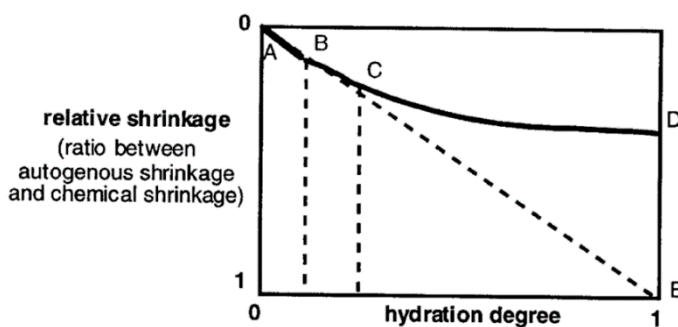
Chemické smršťování označuje interní objemovou redukci. Ta je zapříčiněna rozdílem absolutního objemu hydratačních produktů a objemu komponentů, které vstupují do reakce. Objem hydratačních produktů je menší než objem komponentů vstupujících, což jsou nejčastěji cement a voda. Rychlost redukce je nepřímo úměrná stupni hydratace. Po skončení hydratačních reakcí se chemické smršťování zastaví. Odhadem se chemické smrštění hydratované cementové pasty projeví v poklesu objemu asi o 10 % [3][4][5].

3.1.3 Autogenní smršťování

Autogenní smršťování je vnější objemová nebo lineární změna cementového systému. Toto smršťování nastává při tzv. uzavřeném ošetřování. Obecněji řečeno bez možnosti

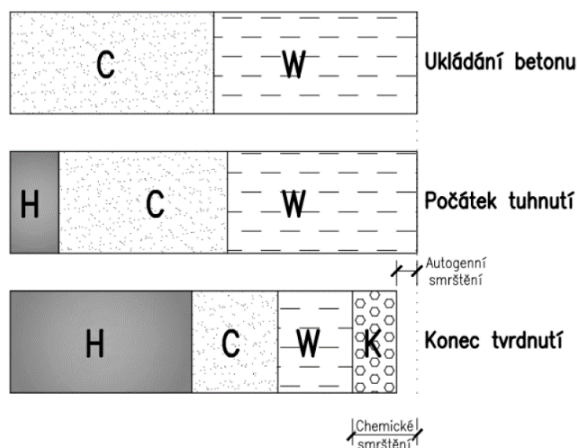
výměny vlhkosti s okolím. Autogenní smrštění je způsobeno chemickým smrštěním. Obě tato smrštění jsou ekvivalentní v době, kdy se cementový systém chová přibližně jako kapalina. Na Obr. 1 můžeme vidět vývoj autogenního smrštění v závislosti na stupni hydratace. Jednotlivé složky můžeme rozdělit do několika fází:

- Ihned po smíchání vody s cementem je beton stále tekutý. Nacházíme se mezi body AB a autogenní smrštění je přímo úměrné stupni hydratace a je způsobeno pouze chemickými reakcemi cementového gelu.
- Poté se začne formovat skelet a gel začne odolávat části chemického smrštění. Nyní se nacházíme mezi body BC, kde jde vidět mírný pokles od původní přímé úměry.
- Za bodem C beton již má nějakou tuhost a autogenní smrštění téměř není ovlivněno chemickým smrštěním, nýbrž je způsobeno samovysycháním.



Obr. 1 Vývoj autogenního smrštění v závislosti na stupni hydratace (převzato z [6])

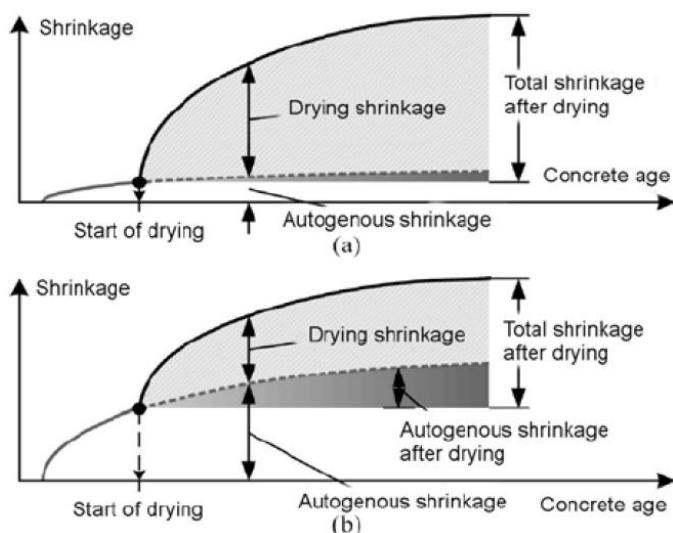
Pokud klesá hodnota vodního součinitele, stoupá velikost autogenního smrštění. Díky tomu u vysokopevnostních betonů, jež mají nízkou hodnotu vodního součinitele, může autogenní smrštění nabývat významných hodnot [3][5][6].



Obr. 2 Chemické a autogenní smrštění (C – nehydratovaný cement, W – voda, H – hydratační produkty, K – kapiláry) (Převzato z [3][6][7])

3.1.4 Smršťování vysycháním/odpařováním

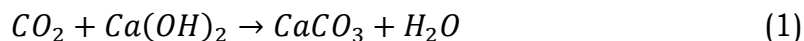
Smršťování vysycháním je vyvoláno úbytkem vody v čerstvém a ztuhlém betonu způsobeným odpařováním záměsové vody. Princip smršťování vysycháním nebo odpařováním je podobný jako u samovysychání. Rozdíl tkví v tom, že toto odpařování směřuje k vyrovnaní relativní vlhkosti v kapilárách a v okolním prostředí [5].



Obr. 3 Znárodnění autogenního smršťování a smršťování vysycháním/odpařováním (a – beton běžné pevnosti, b – vysokopevnostní beton) (Převzato z [7])

3.1.5 Smrštění způsobené karbonatací

Karbonatace (někdy karbonizace) je pravděpodobně reakce oxidu uhličitého (který je obsažen ve vzduchu) s krystaly hydroxidu vápenatého, který vzniká hydratačním procesem cementu při působení tlakového napětí, vynuceného smršťováním od vysychání. Následně dochází k ukládání uhličitánu vápenatého v prostoru uvolněném napětím.



Tato reakce je nepříznivá zejména kvůli snížení pH betonu. To pak snižuje negativně trvanlivost železobetonu a výztuž není chráněna proti korozi. Dále je karbonatace příčinou i smrštění betonu. Vzhledem k malé hodnotě tohoto smrštění nabývá tento typ smrštění na nevýznamnosti [3][5].

3.2 PROJEVY SMRŠŤOVÁNÍ

Mezi hlavní projevy smršťování patří objemové změny betonu. Tyto změny od smršťování nebo nabývání patří do skupiny tzv. relogických vlastností betonu, které se projevují ve změně objemu betonu nezávisle na vnějším zatížení. Na druhé straně stojí

pak objemové změny závislé na vnějším zatížení. To pak může být např. změna vlivem teplotních změn, dotvarování, pružné a trvalé přetvoření od silového zatížení. Samotné smršťování se projevuje na konstrukcích různými symptomy [5].

- Tvorba trhlin na povrchu prvku.
- Prosté zkrácení prvku (pouze v případě tzv. volného smršťování).
- Změna napjatosti v průřezu prvku (pouze v případě tzv. vázaného smršťování).

3.2.1 Volné smršťování

Při volném smršťování není prvek bráněn se volně deformovat vnějšími vazbami a ten se tak může volně deformovat. Měření a vyhodnocování průběhu a velikosti deformací během procesu volného smršťování patří mezi standardní zkušební postupy, jejichž výsledky lze využít mezi jinými pro predikci vzniku smršťovacích trhlin. Na základě sledování průběhu smrštění v čase můžeme také porovnávat kvalitu návrhu betonu (z hlediska snížení míry smrštění). To jsou hlavní důvody, proč je vhodné volné smršťování vyhodnocovat a zaznamenávat.[3][5].

Je několik způsobů měření smrštění. V samotném základu jsou ale stejné a to tak, že betonu musí být umožněno se volně deformovat a dále se tato deformace musí zaznamenávat co nejdříve po uložení čerstvého betonu do bednění či formy. Prvek betonu se tedy může smršťovat, aniž by v něm vznikalo vynucené napětí. Samozřejmě v průběhu experimentu musí být udržovány neustále stejné podmínky okolního prostředí (teplota, relativní vlhkost vzduchu) a tyto podmínky musí být neustále monitorovány souběžně s měřením průběhu smršťování. Hydratace cementu je totiž závislá na okolní teplotě a tím pádem je teplotou ovlivněna i rychlost zrání betonu. Dalším faktorem ovlivňujícím smršťování betonu, zejména smršťování vysycháním, je relativní vlhkost vzduchu. Ustálené podmínky okolního prostředí je těžké dodržet při měření v terénu, při experimentech prováděných v laboratořích se pak snažíme vyvarovat se všem činitelům, ovlivňujícím okolní prostředí, a proto se tato měření zpravidla provádějí v klimatizovaných prostorách s možností regulace teploty a relativní vlhkosti vzduchu [3].

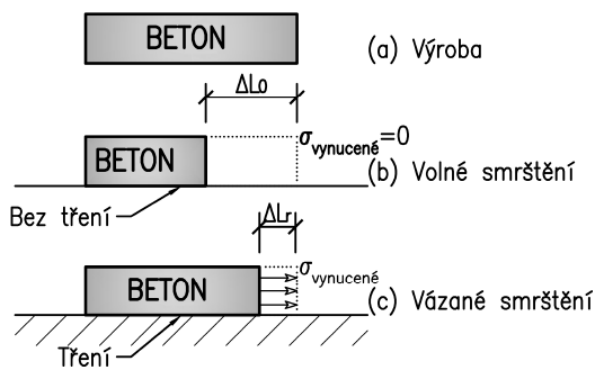
3.2.2 Vázané smršťování

Při vázaném smršťování je prvek bráněn buď částečně, nebo plně vnějšími vazbami se volně deformovat. Mezi vázané smršťování v betonových konstrukcích můžeme považovat i smršťování spřaženého průřezu (tvořen betony různého smrštění např. díky různému stáří), a také omezení volné deformace vlivem soudržnosti betonu s výztuží [5].

Velikost tohoto vázaného smrštění je odlišná od velikosti volného smršťování. Je to dáno právě oním bráněním prvku se volně deformovat. Rozdíl velikosti je dán tuhostí a množstvím omezujících vazeb. Jako příklad můžeme uvést okrajové podmínky nebo vyztužení prvku. Dále závisí na geometrii a rozměrech prvku a také na třídě použitého betonu [3][8].

Rozdíl mezi volným a vázaným smršťováním lze kvalifikovat pomocí tzv. stupně omezení při smršťování (angl. *degree of restraint*) a je ilustrován na Obr. 4.

- Ihned po výrobě je beton tekutý a nemá žádnou pevnou strukturu. Veškeré objemové změny jsou vykompenzovány změnami pozic částic v betonu. Díky tomu v něm prozatím nevzniká žádná napjatost. V této fázi se nacházíme v části (a). Co se týče tvorby trhlin v rámci smršťování, tak ta v tuto chvíli není nijak významná [6].
- Po nějaké době beton začne tuhnout a tím pádem se v něm začne formovat nosný skelet. Beton se dále smršťuje. Zde se obrázky rozcházejí dle okrajových podmínek. Pokud jde o volné smršťování, nacházíme se v části (b). Beton se smrští o hodnotu ΔL_0 a napětí je rovno nule [3].
- Jiná situace je, když existují vazby, které brání betonu se volně smršťovat. Tím pádem délkové změny nedosahují takových hodnot, jako při volném smrštění a díky tomu vzniká v prvku vynucené napětí. V tomto případě se nacházíme v části (c) [3].



Obr. 4 Zobrazení volného a vázaného smrštění (převzato z [3])

Stupeň omezení ψ můžeme definovat takto [8]:

$$\psi = \frac{\Delta L_0 - \Delta L_r}{\Delta L_0} = 1 - \frac{\Delta L_r}{\Delta L_0} \quad (2)$$

Kde:

- ΔL_0 – hodnota volného smrštění
- ΔL_r – hodnota vázaného smrštění

V případě jednoose omezené deformace prvku lze stupeň omezení předpokládat takto [3][8]:

$$\psi = \frac{1}{1 + \frac{A_c E_{cm}}{A_F E_F}} \quad (3)$$

Kde:

- A_c – plocha průřezu betonového prvku
- E_{cm} – modul pružnosti betonového prvku
- A_F – plocha omezujícího prvku (např. betonářská výztuž či podloží)
- E_F – modul pružnosti omezujícího prvku

Z uvedených hodnot můžeme vyčíst, že stupeň omezení ψ může nabývat hodnot mezi 0 a 1. Volné smršťování je stupeň omezení roven nule a při dokonalém upnutí je stupeň omezení roven jedné [3].

3.2.3 Příznivé účinky smršťování betonu

Smrštění má na konstrukci především negativní dopad. To však neznamená, že nemůžeme najít i příznivé účinky smrštění. Jedním z nich je zvýšení přilnavosti betonu k oceli. V konzolových stádiích výstavby komorových nosníků způsobuje diferenční smršťování (rozdílné smršťování horní a dolní desky) deformaci, která jde proti směru gravitace. U sloupů můžeme zase vidět příznivý dopad autogenního smršťování, kde během růstu hydratačního tepla se beton rozpíná a autogenní smršťování toto rozpínání redukuje. To má však příznivý dopad jen v první části. Jakmile dojde vrcholu vnitřní teploty, beton se začne ochlazovat a smršťování, i teplotní kontrakce působí společně a to negativně [5].

3.2.4 Nepříznivé účinky smršťování betonu

Smršťování úzce souvisí s ošetřováním betonu po celou dobu jeho zrání a ovlivňuje výslednou trvanlivost betonové konstrukce. Jedním z faktorů, které ovlivňují trvanlivost

betonu, je předčasné vyschnutí povrchu betonu, které má závažné důsledky na trvanlivost betonu. To přispívá k dalšímu rozvoji sítě kapilár, což způsobí snadnou penetraci iontů dovnitř betonu. Dalším, daleko hrozivějším faktorem je tvorba smršťovacích trhlin na povrchu konstrukce, způsobených buď nevhodným ošetřováním betonu, nebo nevhodným návrhem jeho složení, anebo kombinací obojího. Jak vzniklé trhliny, tak samotná hodnota smrštění má důsledek například u předpjatých konstrukcí, kde způsobuje ztráty předpětí, jelikož napětí vzniklé v konstrukci během výstavby nebo vynucené vnějšími zásahy se díky smršťování časem změní [4][5].

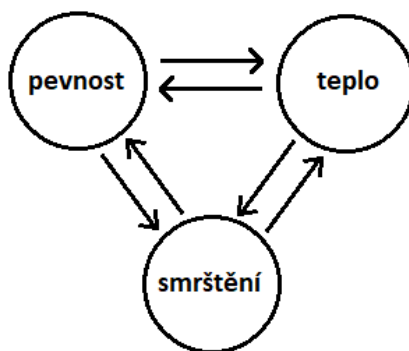
Problémy nastávají i u železobetonových prvků nesymetricky vyztužených, jelikož smršťování ovlivňuje velikost jejich průhybu. To vše díky funkci výztuže, protože výztuž zabraňuje volnému průběhu smršťování, což má za následek, že se zkracují vlákna na nevyztuženém okraji jinak než na vyztuženém. Stejný princip můžeme najít u průřezů vytvořených z betonů s různým smršťováním [5].

3.3 DĚJE PROBÍHAJÍCÍ V PRVNÍCH 72 HODINÁCH

Mechanické vlastnosti betonu v rané fázi zrání betonu mají zásadní význam pro projektanty staveb. Vlastnosti čerstvého betonu, stejně tak jako vlastnosti „mladého“ ztvrdlého betonu mohou výrazně urychlit nebo zpomalit výstavbu a určit kvalitu celé stavby. Značně viditelné je to především u důležitých staveb jako jsou např. jaderné elektrárny. Proto je počáteční fáze tvrdnutí betonu považována jako jedna z nejdůležitějších částí života konstrukce. Je proto nutné mít informace o všech procesech, které se uvnitř dějí [9].

3.3.1 Hydratační reakce

Samotný pojem „hydratační reakce portlandského cementu“ nespadá zrovna do vědecké definice. V podstatě jen říká, že pokud je portlandský cement v kontaktu s vodou, začne cementová pasta v důsledku reakcí mezi vodou a složkami cementu tvrdnout. To je provázáno uvolňováním tepla a kontrakcemi objemu pevné fáze. Tím pádem je nabývání pevnosti betonu doprovázeno objemovými změnami a zvyšováním tepla. Ilustraci celého procesu ukazuje tzv. „Bermudský trojúhelník“ betonářů. Není možné, aby beton nabýval na pevnosti bez toho, aniž by došlo k dalším dvěma průvodním jevům. S těmito doprovázenými jevy se dá žít, ačkoliv dokáží uživatelům betonu zavařit [4].



Obr. 5 Takzvaný „Bermudský trojúhelník“ betonářů (Převzato z [4])

Pro vysvětlení reakcí můžeme portlandský cement považovat za směs pěti hlavních fází: C_2S a C_3S , C_3A a C_4AF . Další složkou je síran vápenatý, který je přidáván jako regulátor tuhnutí a tvrdnutí cementu. Další složky jsou takzvané nečistoty v portlandském cementu, jako například alkalické sírany, volné vápno, nezreagovaný křemen, periklas atd. [4].

Hydratace čistých fází vyústí v tvorbu kalcium-silikát-hydrátů (stručně označovány jako C-S-H gel) a v tvorbu portlanditu, který má označení $Ca(OH)_2$ (zkráceně CH). Z důvodu výskytu síranu vápenatého, a vody C_3A se transformuje na ettringit, $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ a poté na monosulfát C_4AF , který hydratuje podobně jako C_3A , ale znatelně pomaleji. Dle vzájemného poměru všech těchto fází, v závislosti na měrném povrchu cement, vodním součiniteli, teplotě prostředí a teplotě složek betonu vyvine cement během hydratace více či méně hydratačního tepla a tím pádem může dosáhnout rychlejšího či pomalejšího nárůstu a vyšší či nižší konečné hodnoty pevnosti. Díky fenoménu uvolňování tepla během hydratace cementu můžeme na základě průběhu teplot měřených uvnitř betonu a informaci o stupni hydratace cementu odhadnout aktuální pevnost betonu [4].

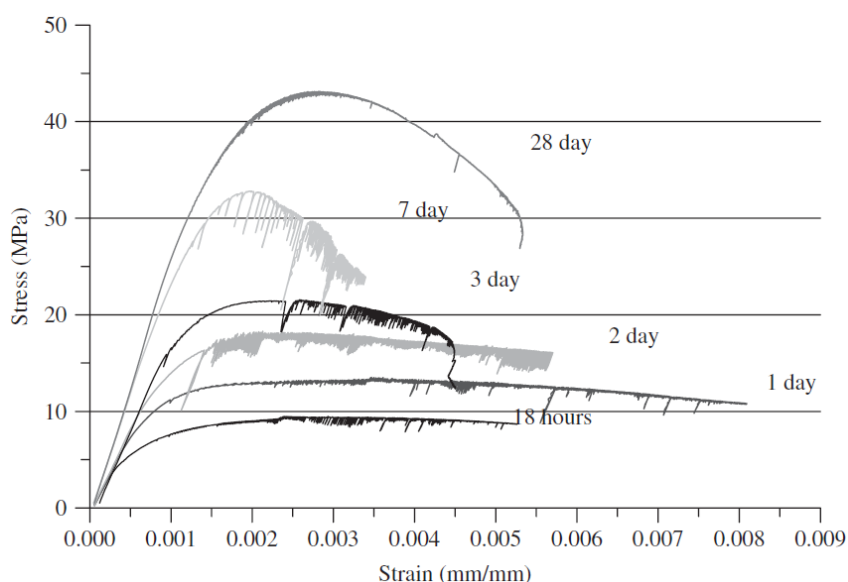
S hydratujícími složkami C_3S a C_2S , které tvoří podstatnou část portlandského cementu, je spojena i redukce objemu pevné fáze. Máme cement o objemu A, o kterém chceme, aby zhydratoval. Tudiž musíme použít vodu o objemu B. Když toto dáme dohromady, vzniknou hydráty o objemu C, kde platí, že $C < A + B$ [4]. Výzkumníci se neustále nemohou shodnout na poměrech těchto tří složek, avšak navzdory tomu se shodnou, že redukce objemu pevné fáze je kolem 10 % [4].

Když je beton obalen do dokonalého těsného obalu, a tudíž izolován od vnějších vlivů, tak pouze v takovém případě způsobuje objemovou kontrakci pevné fáze smrštění od samovysychání. Výsledné smrštění je podobné, jako když beton vysychá a není ošetřován vodou nehledě na jeho vodní součinitel. Samovysychání nastává při hydrataci v cementové matici s nízkým vodním součinitelem, kde dochází k intenzivnímu vzniku

husté síť pórů s malým poloměrem. Tyto póry odvádějí vodu z kapilár o větším poloměru a pokud je přítomno nízké množství záměsové vody a nedostatečné ošetřování, kapiláry vysychají. Pokud položíme vzorek do vody bezprostředně po tom, kdy začnou probíhat hydratační reakce, budou jemné póry tvořené smrštěním v důsledku hydratace zaplňovány vodou. Tato voda bude později odváděna z větších kapilár a současně se do těchto kapilár dostává ošetřovací voda. Jak vidíme, termín samovysychání v tomto případě není vhodný. Lepší vyjádření by bylo například „chemické smrštění pevné fáze“. Chemické smršťování se může a nemusí projevit jako samovysychání, záleží na způsobu ošetřování betonu [4][10].

3.3.2 Vývoj tlakové pevnosti betonu během zrání

Vlastnosti betonu jsou odlišné v závislosti na stáří betonu. Jako příklad může posloužit změna tvaru deformačního diagramu betonu v tlaku (Obr. 6). Z něj můžeme kromě pevnosti zjistit i hodnotu modulu pružnosti v tlaku. V grafu si můžeme povšimnout, že jsou zde velké rozdíly v chování betonu v různých stáří zrání. Čím je beton starší, tím je stoupající část křivky strmější a lineárnější. Po 7 dnech zrání už je vidět ona známá křivka chování betonu v tlaku. Do stáří 3 dnů můžeme vidět, jak je beton stále plastický a tvárný. Ve třetím dni zrání je jeho pevnost přibližně poloviční ve srovnání s pevností v 28 dnech [9].



Obr. 6 Vývoj pevnosti betonu v tlaku v závislosti na době zrání (převzato z [9]).

3.3.3 Trhliny a tah

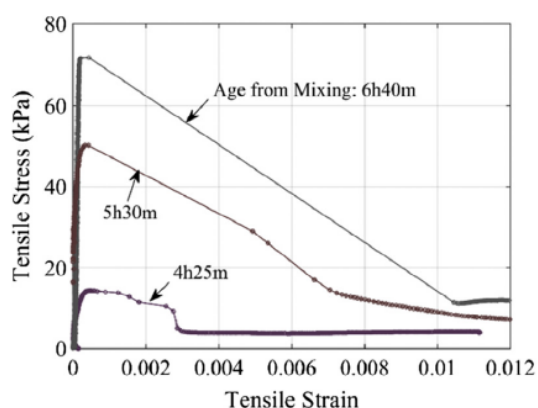
Trhliny v „mladém“ betonu jsou závažnou problematikou a musí se jim předcházet co nejvíce. Velmi často totiž trhliny, jež vzniknou v prvních fázích tuhnutí betonu, se poté

dále rozšiřují ve ztvrdlém betonu vlivem pokračujícího smršťování a působení vnějšího zatížení.

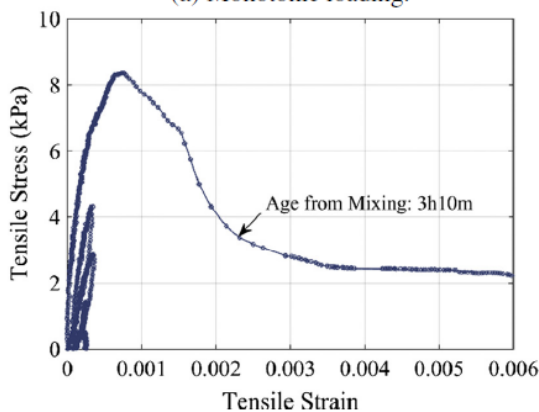
Základním mechanismem je tahové napětí nebo deformace. Důležitý je i fakt, že pokud trhliny nevznikají, ještě není vyhráno. Zbytkové napětí z důvodu zabránění deformace v rané fázi může vyústit ve snížení pevnosti betonu v tahu a tím pádem ohrozit celou konstrukci.

Proto je nutné znát přesné chování betonu v tahu v průběhu celé doby jeho zrání, aby se takovým případům dalo zabránit [11].

Na toto téma byly vykonány experimenty. Typické křivky napětí a deformace můžeme vidět na Obr. 7. Z těchto křivek může být odvozeno několik dalších vlastností betonu v raném stáří, jako například pevnost v tahu, modul pružnosti, kapacita tahového namáhání a energie lomu. Povšimněme si, že napětí po dosažení určitého stupně namáhání klesá. Je to zapříčiněno rozšiřováním a propagací trhlin ve struktuře zkušební vzorku. Dále můžeme vidět, že samotná pevnost se pohybuje v řádek kilopaskalů, neboť stáří zkoušeného betonu se pohybuje v řádech hodin od jeho namíchání [11].



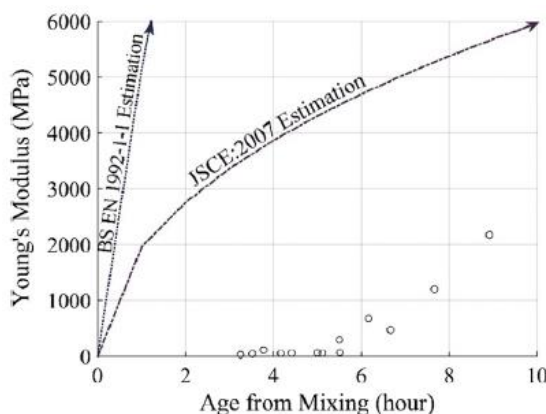
(a) Monotonic loading.



(b) Cyclic loading.

Obr. 7 Typické deformační diagramy betonu v tahu (převzato z [11]).

Jak bylo řečeno, další vlastností, která se takto může měřit je modul pružnosti v tahu (dále zmiňován pouze jako modul pružnosti). Výsledky experimentů a měření můžeme vidět na Obr. 8. Zde je znázorněna závislost velikosti modulu pružnosti na stáří betonu (doba od namíchání betonu). Během prvních 5 hodin byl modul pružnosti až zanedbatelně malý. Avšak po těchto prvních 5 hodinách jeho velikost začala rychle narůstat. Tyto hodnoty korespondují s dostupnými modely pro předvídání nárůstu modulu pružnosti [11].



Obr. 8 Vývoj modulu pružnosti v závislosti na stáří betonu (převzato z [11]).

3.4 SMRŠŤOVÁNÍ DLE NORMY ČSN EN 1992-1-1

Smršťování a dotvarování se má dle normy ČSN EN 1992-1-1 uvažovat v mezních stavech únosnosti pouze tam, kde je jejich účinek významný. To je například u mezního stavu stability nebo při přídavných účincích zatížení vyvolaných deformacemi konstrukce. V ostatních mezních stavech únosnosti účinky smršťování nemusí být uvažovány. V těchto případech však musí být duktilita a rotační kapacita prvků dostatečná. Vliv smršťování a dotvarování má být co nejmenší, aby se minimalizovaly deformace a tím pádem i trhliny. Vzhledem k tomu, že diplomová práce neřeší otázku dotvarování, budou v tomto odstavci shrnuty informace týkající se pouze smršťování [12].

3.4.1 Celkové poměrné smršťování

Celkové poměrné smršťování se skládá z poměrného smršťování vysycháním a poměrného autogenního smršťování. Dle normy jsou z hlediska monitorování nejdůležitější první dny po výrobě betonu. Vztah pro výpočet celkového poměrného smršťování [12] je k nalezení v rovnici (4).

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (4)$$

Kde

- ε_{cd} – poměrné smršťování vysycháním
- ε_{ca} – poměrné autogenní smršťování

3.4.1.1 Poměrné smršťování vysycháním

Poměrné smršťování vysycháním v určitém čase určíme ze vztahu [12]:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad (5)$$

Součinitel $\beta_{ds}(t, t_s)$ se určí ze vztahu:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{(t - t_s) - 0,04 \cdot \sqrt{h_0}^3} \quad (6)$$

Kde:

- t – stáří betonu v uvažovaném okamžiku, ve dnech
- t_s – stáří betonu (dní) na začátku smršťování vysycháním (nebo na začátku nabývání)
- h_0 – náhradní rozměr průřezu = $2A_c/u$ [mm] kde A_c : průřezová plocha betonu, u : obvod části průřezu vystavené vysychání
- k_h – součinitel závisící na náhradní tloušťce h_0 podle tabulky Tab. 1 (v normě tab. 3.3)

Tab. 1 Hodnoty k_h ve vztahu (5)

h_0 (mm)	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Zdroj: Přejato z [12]

3.4.1.2 Poměrné autogenní smršťování

Poměrné autogenní smršťování je dáno vztahem [12]:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (7)$$

Kde:

- $\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$
- $\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2 \cdot t^{0,5}}$
- t – čas ve dnech

3.4.2 Závěr

Můžeme si všimnout, že norma hodně používá součinitele a tabulky za různých podmínek, které jsou trochu benevolentnější k výpočtu hodnoty smrštění. Jako například smrštění se v některých případech ve výpočtu neuvažuje a zde je možná diskuze, zda mohou být či nemohou být případy, kdy by se uvažovat měl. Navíc postup ignoruje poměry složení, přísady a příměsi betonu. Právě tyto parametry mohou do velikosti objemových změn značně zasáhnout [10].

3.5 MODEL B4

Existuje několik modelů pro predikci smršťování, které vycházejí z experimentů a jsou postaveny na matematických modelech. Neustále se zlepšují a vyvíjejí, pro lepší predikci výsledného smrštění. Modely se snaží odrážet realitu, tudíž jednou z oblastí, ze kterých vychází, jsou statistická data z experimentů.

Model B4 od autorů Mija H. Hubler, Roman Wendner a Zdeňka P. Bažanta je založen na databázi 1050 experimentálních křivek smrštění a statistického porovnání s existujícími modely smršťování. Model simuluje smrštění prvků na velká rozpětí, jelikož ty jsou ovlivněny nekonstantním zbytkovým napětím ve svém průřezu z důvodu dotvarování a kvůli mikrotrhlinám [1].

Z důvodu komplexnosti modelu B4, jsou zde uvedeny a popsány pouze základní rovnice a součinitelé. Detailní popis a výčet rovnic lze najít v [13].

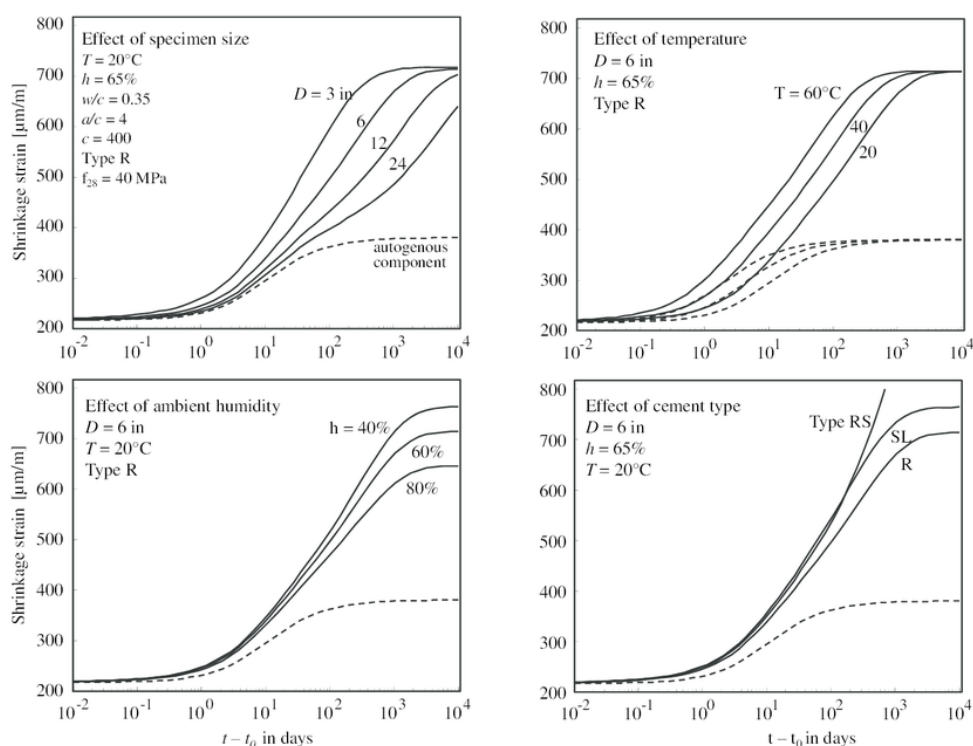
3.5.1 Stručný popis

Model je následovníkem modelu B3 z roku 1995. Jedním z hlavních vylepšení modelu jsou samotné rovnice pro předpověď vysychání, které představuje většinu podílu smrštění. Porovnání bylo provedeno pro betony s vysokým a nízkým vodním součinitelem. Dalším zlepšením jsou rovnice pro autogenní smršťování, které mají jiné

fyzikální mechanismy a tento druh smrštění je důležitý pro vysokohodnotné betony s přísadami, příměsemi a s nízkým vodním součinitelem [1].

Model byl statisticky kalibrován dle databáze laboratoře na testy smrštění, kde se oddělily jednotlivé složky fyzikálních jevů. Nové vzorce pro predikci smrštění se shodují s křivkami času jednotlivých testů smrštění s minimální chybou [1].

Příklady křivek modelu B4 jsou na Obr. 9. Jsou zde ukázány i nejpodstatnější rovnice pro výpočet smrštění, jako rovnice pro smrštění autogenní, vysycháním, poločas smrštění a celkové smrštění. Cílem této diplomové práce není opisovat publikaci, tudíž všechny rovnice, jejich popis, a i ukázkové výpočty jsou v publikaci profesora Bažanta v [13]. Lze ji také stáhnout na webové stránce plné publikací profesora Bažanta <http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/>, pod číslem 549.



Obr. 9 Typické křivky smršťování dle modelu B4. Ukazující efekt: velikost prvku, teploty, vlhkosti vzduchu, typu cementu (Převzato z [1]).

Autogenní smrštění:

$$\epsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \epsilon_{au\infty} \left[1 + \left(\frac{\tau_{au}}{(\tilde{t} + \tilde{t}_0)} \right)^\alpha \right]^{r_1} \quad (8)$$

Kde:

- $\epsilon_{au\infty}$ – konečné autogenní smrštění
- α – exponent $\alpha = r_x \left(\frac{w/c}{0,38} \right)$
- τ_{au} – poločas autogenního smrštění (dny) $\tau_{au} = \tau_{au, cem} \left(\frac{w/c}{0,38} \right)^{r_{tw}}$

Smrštění vysycháním:

$$\epsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \epsilon_{sh\infty}(\tilde{t}_0) \cdot k_h \cdot S(\tilde{t}) \quad (9)$$

Kde:

- $\epsilon_{sh\infty}$ – konečné smrštění vysycháním
- $S(t)$ – časová křivka $S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t}{\tau_{sh}}}$
 - τ_{sh} – poločas smrštění vysycháním (dny) $\tau_{sh} = \tau_0 k_{\tau a} \left(k_s \frac{D}{1mm} \right)^2$
- k_h – závislost na vlhkosti (dle hodnoty vlhkosti různé rovnice)

Mnohé parametry a rovnice závisí na použitém cementu. Všechny tabulky a závislosti lze najít v publikaci profesora Bažanta pod číslem [13] ve zdrojích. Pro znázornění je zde ukázána tabulka parametrů potřebných pro výpočet autogenního smrštění v závislosti na použitém typu cementu v Tab. 2.

Tab. 2 Parametry autogenního smrštění závisících na typu cementu

Parametr	R	RS	SL
$\tau_{au, cem}$ (dny)	1,00	41,0	1,00
r_{tw}	3,00	3,00	3,00
r_t	-4,50	-4,50	-4,50
r_x	1,00	1,40	1,00
$\epsilon_{au, cem}$	$210 \cdot 10^{-6}$	$-84,0 \cdot 10^{-6}$	$0,00 \cdot 10^{-6}$
$r_{\epsilon a}$	-0,75	-0,75	-0,75
$r_{\epsilon w}$	-3,50	-3,50	-3,50

Převzato z [13]

Kde R – běžný cement, RS – rychle tvrdnoucí cement, SL – pomalu tvrdnoucí cement.

Celkové smrštění:

$$\epsilon_{sh,total}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \epsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) + \epsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) \quad (10)$$

Kde:

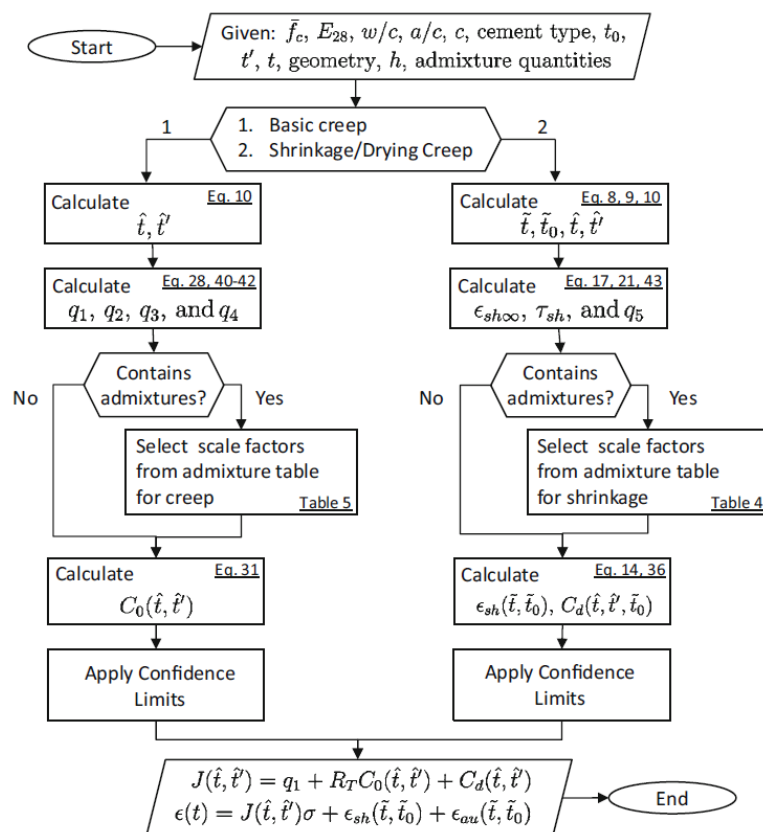
- ϵ_{sh} – smrštění vysycháním
- ϵ_{au} – autogenní smrštění

Výpočet pro srovnání modelu s experimentem je uveden v kapitole 4.5 v praktické části práce.

Jak lze vidět v rovnici (10), celkové smrštění je součtem autogenního a smrštění vysycháním. Smrštění autogenní je v modelu uvažováno jako smršťování utěsněného (uzavřený systém, v němž není umožněna výměna vlhkosti mezi betonovým prvkem a okolním prostředím) prvku. Jeho výsledek je pak dán změnou objemu prvku během chemických reakcí a za přítomnosti samovysychání. Jako další vylepšení je větší rozsah teplot a vlhkostí, které mohou vstoupit do rovnic. Jako další výhody lze zmínit, že všechny parametry složení jsou vyjádřeny bez jednotek, což je bezesporu lepší, než v předcházejícím modelu B3 [1].

Pokud se podíváme na obrázek Obr. 9, je výpočet celkového a autogenního smrštění dán jako funkce typického složení betonu o velikosti D , okolní vlhkosti h , teploty T a typu cementu. Jak již bylo řečeno, celý model je založen na databázi smrštění, kde jeho předpovědi a hodnoty odpovídají experimentálním výsledkům této databáze. Tudiž nemůže poskytnout dokonalý popis konkrétního betonu. Nicméně jelikož je model vytvořen tak, aby předpovídal chování řezu pro nosník nebo desku, je možné s vhodnými statistickými prostředky zachytit chování konkrétního betonu. Tento postup však vyžaduje některá zjednodušení [1][13].

Na Obr. 10 je ukázán postup (algoritmus) stanovení smrštění dle modelu B4. Jak lze vidět, jedná se hlavně o dvě větve, které určují typ výpočtu, na jejichž základě se uživatel rozhoduje, zda chce spočítat dotvarování nebo smrštění. Uvnitř těchto větví dochází ještě k rozhodování, zda jsou do betonu přidány přísady či příměsi. Na jejich základě se pak volí součinitele, které vstupují do výpočtu.



Obr. 10 Postup výpočtu smrštění dle modelu B4 (Převzato z [13]).

3.5.2 Závěr

Můžeme vidět z popisu, že model B4 posunul hranici predikčních modelů opět o něco dál, kdy uvažuje podrobnější informace o tom, co se v prvku při smršťování děje. Oddělil některé klíčové části smrštění, a tak lze snáze vidět v rovnicích a mezivýsledcích, která část hraje větší roli. Dále samotný model vychází ze statistického porovnávání a uvažování, tudíž může snáze odrážet realitu.

3.6 MĚŘENÍ SMRŠŤOVÁNÍ

Veškerá měření a problematika objemových změn betonu (popř. hydratujících past a malt) není v evropských či českých normách příliš řešena. Výpočet objemových změn betonů pro predikci objemových změn je přímo obsažen pouze v ČSN EN 1992-1-1 (Eurokód 2: Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby). Jak bylo zmíněno v kapitole 3.4, norma počítá predikci smrštění vysycháním na základě pevnostní třídy betonu, relativní vlhkosti uložení a součinitele zohledňujícího poměr objemu k povrchu konstrukčního prvku. Autogenní smrštění je získáno z tabulky na základě pevnostní třídy betonu. Celkové smrštění je pak součet autogenního smrštění a smrštění vysycháním [10][12].

Experimentální metody pro měření smršťování betonu můžeme dělit na několik kategorií. Nejzákladnějším kritériem je stav napjatosti hmoty a úroveň mechanické součinnosti měřeného materiálu s okolím. Můžeme měřit objemové změny ve stavech:

- Volný stav
- Vázaný stav
- Při aplikaci vnějšího zatížení

Další kategorií je měření dle období hydratace, ve kterém lze snímat objemové změny. Některé metody mohou přesahovat více období:

- od čerstvého stavu, tj. ihned od uložení do formy
- od doby zisku počátečních mechanických pevností, tj. po konci tuhnutí
- objemové změny vyzrálého materiálu, tj. stáří více než 28 dnů

Co se týče obecného dělení, můžeme dělit měření smršťování dle vlastností měřících přístrojů:

- Dle typu měřícího přístroje
- Dle postupu měření
- Dle veličiny, kterou měříme

Nejčastější hodnota, která se měří, jsou délkové změny zkušebního tělesa od okamžiku uložení betonu do formy, nebo ihned po jeho odformování. Tyto hodnoty se pak přepočítávají na poměrné délkové změny. Je nutné mít na paměti, že v některých případech může beton nabývat na své velikosti. V běžné praxi se však uvažuje především se zápornou délkovou změnou [10][14].

Přehled o dostupném přístrojovém vybavení lze najít v Tab. 3, která uvádí informace o možnosti zahájení měření, rozměrech zkušebních těles, délce měření a využití metody v praxi. Podrobněji jsou jednotlivé metody popsány v následujících kapitolách [14].

Tab. 3 Metody měření smršťování se základními charakteristikami

Skupina	Podskupina	Metoda	Primární určení ⁽¹⁾	Velikost zkušebního vzorku	Počátek měření ⁽²⁾	Použitelnost ⁽³⁾
Tenzometry	Strunové	Strunové tenzometry	Beton	Není přesně definováno*	Začátek tuhnutí	Laboratoř, staveniště
	Optické	Optická vlákna s Braggovou mřížkou	Beton	280 x 75 x 75 mm	Ihned po zamíchání	Laboratoř
	Mechanické	Přenosný deformetr	Beton	Není přesně definováno*	Ztvrdlý vzorek	Laboratoř, staveniště
	Elektrické	Elektrické tenzometry	Beton	Není přesně definováno*	Ztvrdlý vzorek	Laboratoř
		Smršťovací žlab	Beton	Není přesně definováno*	Ihned po zamíchání	Laboratoř
		Ohýbací žlab	Beton	1000 x 100 x 50 mm	Ihned po zamíchání	Laboratoř
		Metoda vlnovce	Cementová pasta	Není známo	Ihned po zamíchání	Laboratoř
		Zařízení pro měření ztvrdlých trámů a válců	Beton	280 x 75 x 75 mm	Ztvrdlý vzorek	Laboratoř
Ostatní	Optické	Smršťovací prstenec	Beton	Φ 405 mm	Začátek tuhnutí	Laboratoř
		CRM	Cementová pasta	Φ 28 mm	Ztvrdlý vzorek	Laboratoř
		Digitální fotometrie	Beton	220 x 40 x 40 mm	Ztvrdlý vzorek	Laboratoř
	Laserové	Fotogrammetrická mikroskopie	Beton	900 x 300 x 150 mm	Začátek tuhnutí	Laboratoř
		Smršťovací kužel	Beton	0,35 l	Ihned po zamíchání	Laboratoř
		Tenkovrstvé vzorky	Cementová pasta	300 x 25 x 5 mm	Začátek tuhnutí	Laboratoř
	Ostatní	Tazavova metoda	Cementová pasta	Není známo	Ihned po zamíchání	Laboratoř

* v závislosti na velikosti/typu měřené konstrukce/vzorku a složení kompozitu

Zdroj: Převzato z [14][13]

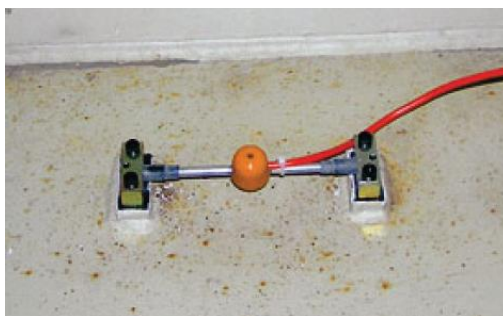
V následujícím textu se seznámíme s různými druhy přístrojového vybavení pro měření smršťování, jejich výhodami a nevýhodami. Každý z těchto přístrojů má svá pozitiva i negativa a nelze jednoznačně říct, že právě jen jeden jediný má dokonale univerzální využití. Proto je třeba se s nimi seznámit, aby se pak pro experimentální měření vybralo co možná nejvhodnější přístrojové vybavení včetně metodiky měření.

3.6.1 Strunové tenzometry

Popis: Strunový tenzometr obsahuje dva kotevní bloky a mezi nimi je napjatá harmonicky oscilující ocelová struna buzená elektromagnetem. Jakákoliv deformace se projeví změnou délky této struny. Jelikož se změní délka a průřez, změní se i frekvence jejího kmitání.

Jelikož jde o měření betonu v plastickém stavu, tenzometry se vyrábějí z nerezové oceli a jsou opatřeny mechanickou ochranou zajišťující odolnost proti korozi a vodě. Strunové tenzometry mohou obsahovat i teplotní čidlo, které slouží ke kompenzaci teplotní závislosti. Nejčastější využití je jejich zabudování přímo do betonové konstrukce a tím pádem zajištění kontinuálního záznamu dlouhodobého měření konstrukčního prvku přímo na staveništi.

Výhody/Nevýhody: Mezi jejich výhody patří i vlastnost, že mohou být použity jako externí příložené zařízení a jejich vysoká přesnost. Mezi nevýhody náleží jejich tuhost, která neumožňuje měření deformací ihned po uložení betonu do formy, a tudíž je měření možné až po dosažení určité míry ztuhnutí betonu. Díky dlouhodobému využívání je tato metoda pravděpodobně nejbližší k zakotvení do norem, což může zajistit její maximální využití napříč stavební praxí [14].



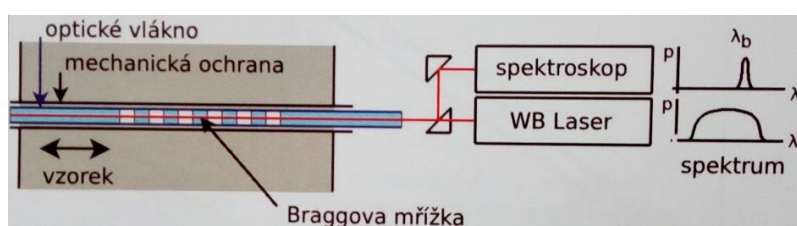
Obr. 11 Strunový tenzometr použitý na betonové konstrukci (Převzato z [15]).

3.6.2 Optická vlákna s Braggovou mřížkou

Popis: Jak název napovídá, optická vlákna s Braggovou mřížkou patří mezi optické tenzometry. Celý princip spočívá v odrazu světla nějaké (konkrétní) vlnové délky, procházejícího optickým vláknem díky difrakční mřížce vyleptané na povrchu vlákna. Pokud se vlákno deformuje, změní se i difrakční mřížka na povrchu a tím pádem dojde k posuvu vlnové délky světla. Spektrální analýzou je poté možné zjistit odráženou vlnovou délku. Z této vlnové délky jde pak zjistit i velikost přetvoření.

Vlákno je chráněno polymerovým krytem. Ten slouží jako mechanická ochrana a ochrana proti vlhkosti. Vlákna jsou aplikována přímo do bednění budoucího vzorku. Jako teplotní kompenzace závislosti se přidává druhé vlákno nezátížené smršťováním.

Výhody/Nevýhody: Použití této metody jsou vysoká přesnost a možnost použití při velkých deformacích. Mezi nevýhody patří vysoká pořizovací cena a náchylnost k mechanickému poškození [14][16].



Obr. 12 Princip optických vláken s braggovou mřížkou (Převzato z [14]).

3.6.3 Elektrické tenzometry – odporové, piezorezistivní, kapacitní

3.6.3.1 Odporové tenzometry

Popis: Nejčastější odporové tenzometry jsou formou tenké fólie s tištěnými elektrickými spoji. Jakmile dojde k deformaci v podélném směru, změní se impedance, která je předmětem měření. Ta se potom použije pro výpočet výsledného přetvoření. Opět tedy neměříme přímo hodnotu přetvoření, ale jinou složku, kterou pak přepočítáme.

Výhody/Nevýhody: Díky nízké ceně a dostatečné přesnosti měření patří mezi nejpoužívanější elektrické tenzometry.

3.6.3.2 Piezorezistivní tenzometry

Popis: Rozdíl mezi odporovým a piezorezistivním tenzometrem je ve fólii. Nyní je nahrazena piezoelektrickým krystalem, který při deformaci také mění svoji impedanci, která se použije pro výpočet přetvoření.

Výhody/Nevýhody: Hlavní výhodou je malá velikost a nízká cena.

Poslední typ elektrických tenzometrů jsou **tenzometry kapacitní**. Ty se však pro měření neosvědčily, jelikož nejsou dostatečně přesné [14][17].

3.6.4 Přenosný deformetr

Popis: Princip měření přenosného deformetru odpovídá mechanickému tenzometru. Samotný princip měření na povrchu vzorku spočívá v trnech nebo břitech, které zapadnou do terčů umístěných přímo na povrchu prvku.

Výhody/Nevýhody: Mezi jeho hlavní výhody je přijatelná cena a tím pádem se hodí pro měření jak v laboratořích, tak na stavbách. Dále je nutné chránit měřené stanoviště, a to zvláště na stavbě, kde by mohlo dojít k posuvu či poškození měřených základů a tím pádem i k diskretizaci měření. Jako další nevýhoda je fakt, že zařízení měří na povrchu prvku, tudíž tyto hodnoty mohou být odlišné od hodnot uvnitř měřeného vzorku [14].



Obr. 13 Přenosný deformetr používaný Ústavem stavebního zkušebnictví

3.6.5 Smršťovací žlab

Popis: Smršťovací žlab je nejčastěji používán pro prvky délky 1 m a průřezu 60–100 mm. Samotný žlab je opatřen fixním čelem opatřeným kotvou. Kotva drží prvek k tomuto čelu. Na druhé straně leží posuvné čelo, které společně s objemovými změnami vzorku se pohybuje a měří deformaci ve směru podélné osy žlabu. Samotný žlab je vyložen

nepřilnavou fólií, například neopren nebo mirelon (Ústav stavebního zkušebnictví používá i teflon). Díky tomu je sníženo tření na minimum a prvek se může volně deformovat. Posuvné čelo je opatřeno LVDT sondou, která automaticky odečítá hodnoty změn délky.

Výhody/Nevýhody: Mezi hlavní výhody této metody je měření ihned po naplnění žlabu, a tedy možnost měření v čerstvém stavu. Nevýhoda je však vysoká pořizovací cena a rozměry žlabu. Díky tomuto se používá výhradně pro laboratorní účely.

Často se tato metoda kombinuje i s měřením hmotnostních úbytků způsobených odpařováním vody, jelikož samotný žlab můžeme položit na váhy. Díky tomu je možné získat více informací o vlastnostech materiálu a průběhu smršťování. Metoda smršťovacího žlabu je zakotvena v normě ÖNORM B 3329 pro variantu žlabů 60x38x1000mm [14][17][18][19].

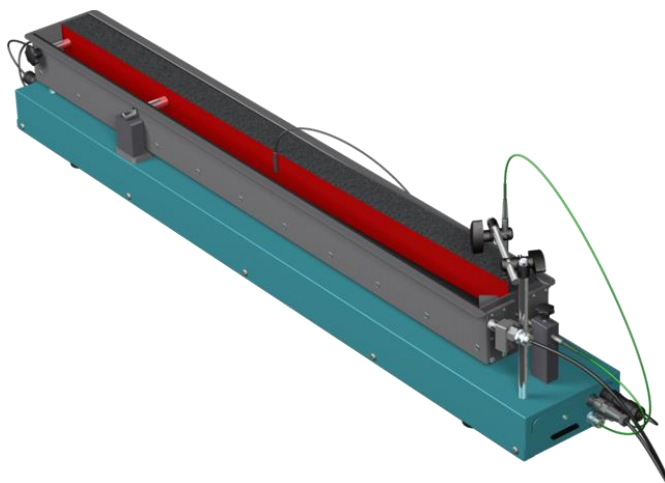


Obr. 14 Smršťovací žlaby používané Ústavem stavebního zkušebnictví

3.6.6 Ohýbací žlab

Popis: Ohýbací žlab je v podstatě stejný, jako smršťovací žlab, jen s tím rozdílem, že dokáže měřit smrštění betonu ve dvou směrech. Na straně fixního čela jsou příčné ocelové tyče, které brání nadzvedávání vzorku. Na straně s posuvným čelem je navíc ještě druhá sonda, která je připevněna svisle směrem k povrchu betonu.

Výhody/Nevýhody: Výhody a nevýhody jsou stejné, jak u smršťovacího žlabu. Ohýbací žlab má navíc výhodu, že je vhodný k měření materiálů, jako jsou například podlahové stěrky [14][17].



Obr. 15 Ohýbací žlab od firmy Schleibinger Testing Systems (Převzato z [17][13]).

3.6.7 Metoda vlnovce

Popis: Metoda vlnovce se používá pro měření autogenního a chemického smršťování jemnozrnných betonů. Princip spočívá v naplnění podlouhlého polymerového obalu cementovou pastou, který se následně vodotěsně uzavře. Vlnovec se poté umístí do kovového rámu. Jeden konec je tím pádem připevněn pevně a druhému je umožněno se posunovat v podélném směru. Posun je měřen LVDT sondou. Celý rám s vlnovcem se ponoří do vodní lázně, která má regulovatelnou teplotu a tím je zajištěno přesně definované měření po dobu experimentu.

Výhody/Nevýhody: Jak z postupu vyplývá, tato metoda není vhodná pro měření betonů standartního složení, a to především z důvodu velikosti zrna použitého kameniva. Běžně používané vlnovce by nebylo možné takovýmto betonem naplnit [14].



Obr. 16 Metoda vlnovce (Převzato z [14]).

3.6.8 Zařízení pro měření ztvrdlých trámů a válců

Popis: Toto zařízení se vyskytuje v různých obměnách. Princip ale zůstává víceméně stejný. Konstrukce tvořená podstavcem s kovovou kuličkou o průměru 10 mm a měřící jednotkou s měřící sondou nacházející se nad tímto podstavcem. Mezi měřící sondu a

kovovou kuličku se umístí nejčastěji betonový kvádr či válec o výšce 280 mm nebo 300 mm. Ve většině případů měří délkové změny LVDT sonda nebo mechanický úchylkoměr. Tento způsob měření je základem užívaného zkušebního normativu ČSN EN 13872 (2004).

Výhody/Nevýhody: Vzorek je možné zkoušet vzorek nejdříve po 24 h od výroby čerstvého betonu, a tudíž je potřeba ho mít uložen v kontrolovaném prostředí [14][17][20].

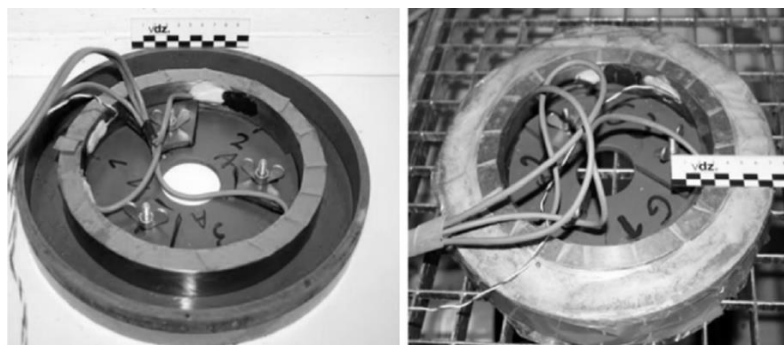


Obr. 17 Zařízení pro měření ztvrdlých trámů a válců používaný Ústavem stavebního zkušebnictví

3.6.9 Smršťovací prstenec

Popis: Smršťovací prstenec se skládá z kruhové formy s mezikružím. Na vnitřní mezikružím se umístí tenzometry. Následně se mezikružím vyplní čerstvým betonem. Tenzometry pak měří deformace vyvolané smrštěním.

Výhody/Nevýhody: V Česku není tento způsob měření příliš zakotven, avšak je zakotvena v americké normě ASTM C1581/C1581M – 09a pro použití k experimentálnímu měření smršťování [14][21].

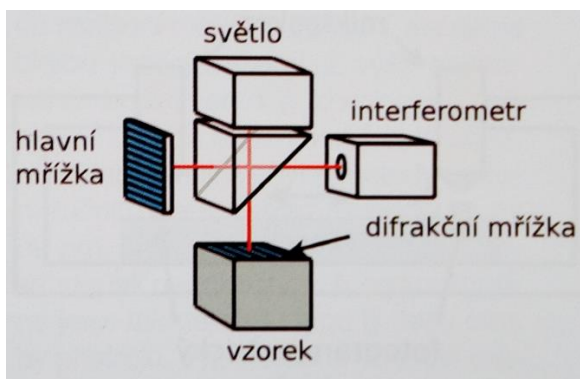


Obr. 18 Zobrazení prstenců pro měření deformací vyvolaných smrštěním (Převzato z [10]).

3.6.10 Cure Reference Method (CRM)

Popis: Princip CRM je založen v otisknutí fotorezistivní difrakční mřížky do epoxidové pryskyřice, jenž je na povrchu vzorku. Při průběhu smršťování dochází k deformaci difrakční mřížky. Tato mřížka se osvítlí infračerveným světlem a společně s mřížkou jsou vyvolány interferenční obrazce, které jsou zachyceny kamerou. Z těchto obrazců se následně vypočítá smrštění.

Výhody/Nevýhody: Hlavní výhodou této metody je měření deformací na celém povrchu měřeného vzorku. Toto však nese své nevýhody, což je omezená velikost testovaného vzorku a vysoká cena zařízení [14].



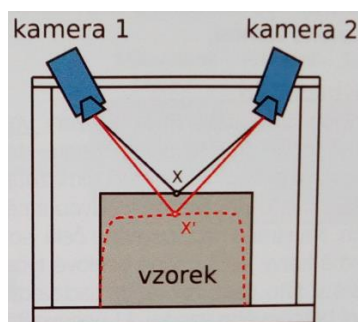
Obr. 19 Princip Cure reference method (Převzato z [14]).

3.6.11 Digitální fotogrammetrie

Popis: Digitální fotogrammetrie využívá dvě statické kamery, které sledují vzorek. Z jejich snímků, které zachycují v průběhu celého měření, se vytvoří 3D model sledovaného vzorku. Díky triangulaci a znalosti polohy obou kamer lze vypočítat změnu polohy bodů vzorku.

Jedná se relativně o novou optickou metodu pro měření smršťování na již ztvrdlých vzorcích.

Výhody/Nevýhody: Její nízká cena a jednoduchost nabízí možnost i měřit mimo laboratoře. Nevýhodou je její malá přesnost. Další nevýhodou je nutná podmínka absolutní státnosti záměrných bodů a kamer, což se na stavbě může lehce pokazit [14].

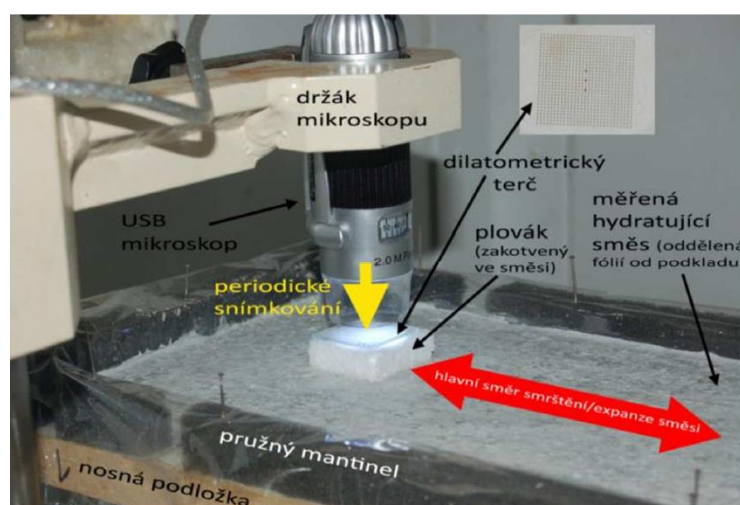


Obr. 20 Digitální fotogrammetrie (Převzato z [14]).

3.6.12 Fotogrammetrická mikroskopie

Popis: Fotogrammetrická mikroskopie používá statický digitální mikroskop pro sledování fotogrammetrického terče. Tento terč je uložen na povrchu vzorku na plastovém plováku. Vlivem smršťování dochází k unášení zmíněného plováku a tím pádem i pohybu terče. Po ukončení snímání se všechny pořízené snímky zanalyzují. V zorném poli mikroskopu se pomocí skladby digitálního obrazu série snímků vyhodnotí posun těžiště plováku vůči předchozímu snímku. Tento posun lze pak přepočítat do metrické soustavy a tím pádem získání hodnoty délkového přetvoření.

Výhody/Nevýhody: Tato metoda je vhodná pro laboratorní využití, jelikož její přesnost závisí na přesném umístění celého zařízení a možnost použití měření ihned po vylití čerstvého betonu [10][14].



Obr. 21 Příklad fotogrammetrické mikroskopie (konkrétně snímání posunů při rozlivu čerstvého betonu v tenké vrstvě) (převzato z [10]).

3.6.13 Smršťovací kužel

Popis: Metoda smršťovacího kužele spočítá ve vlastnostech obráceného kužele. Při úbytku materiálu uvnitř kužele dochází k rovnoměrné změně výšky. Celé zařízení se skládá z dvouplášťové nádoby (tvar má obráceného kužele) a rámu. Na rámu je umístěn laserový dálkoměr. Kužel se naplní záměsí a na její povrch se umístí plovák s terčem. Laserový dálkoměr měří změnu výšku kužele, ze kterého lze následně vypočítat úbytek objemu a tím i velikost objemového smrštění.

Výhody/Nevýhody: Metoda smršťovacího kužele je používána laboratorně a je vhodná pro měření objemových změn čerstvých materiálů jako je beton nebo cementová pasta. Tím pádem je vhodná zejména pro prvotní objemové změny, které jsou zapříčiněny chemickými procesy v čerstvém materiálu [14].



Obr. 22 Smršťovací kužel používaný Ústavem stavebního zkušebnictví

3.6.14 Měření tenkovrstvých vzorků

Popis: Pro měření tenkovrstvých vzorků se využívá laserových dálkoměrů. Hodí se především pro maltoviny, potěry a ostatních jemnozrnných materiálů. Metoda obsahuje fixní rám s laserovými dálkoměry. Na vzorku se nachází terče umístěné na plovácích, které jsou unášeny testovanou záměsí. Laserové dálkoměry míří horizontálně a terče jsou umístěny na povrchu vzorku. Měření rovněž umožňuje měřit váhové úbytky a tím pádem i zvyšuje počet informací, které z této metody můžeme získat.

Výhody/Nevýhody: Metodu lze využít i pro získání délkových změn ve dvou směrech, jelikož můžeme umístit laserové dálkoměry v podstatě na jakékoliv místo okolo vzorku. Lze ji použít i pro vázané smršťování [14][13][17].



Obr. 23 Metoda pro měření tenkovrstvých vzorků od Schleibinger Testing Systems (Převzato z [17]).

3.6.15 Tazawova metoda

Popis: Tazawova metoda se skládá z nádoby, do které je shora zavedena tenká pipeta. Nádoba se naplní cementovou pastou a následně vodou. V pipetě jsou definované výšky pasty a vody či oleje. Během smršťování se hladina snižuje a na konci měření se odečte z pipety konečná výška a z ní vypočítá celkové smrštění.

Metoda se používá pro cementové pasty a jejich chemického smrštění. Ve výpočtu se využívá chemická rovnice reakce cementových past a do ní vstupuje konečná výška hladiny. Tazowova metoda je zakotvena v normě ASTM C1608-12 [13][22].

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části diplomové práce bylo hlavním účelem vyrobit vlastní vzorky betonu, ty osadit do měřicího zařízení a naměřit příslušná data související se smršťováním vybraného materiálu. Na základě dosažených výsledků pak bylo provedeno jejich shrnutí a vyvozené příslušné závěry. Nakonec bylo smrštění vypočítání dle modelu B4 s výsledky experimentálního měření.

V rámci této diplomové práce bylo provedeno podrobné zpracování a vyhodnocení dat pro tři velké žlaby, a to v prvních 72 hodinách. Ostatní žlaby a další doprovodná měření včetně dlouhodobého měření smršťování po odformování zkušebních těles je v práci zmíněno pouze okrajově, vzhledem k souvislostem s řešením projektu GA17-14302S „Experimentální analýza objemových změn cementových kompozitů v raném stádiu tuhnutí“. Podrobné zpracování a vyhodnocení doprovodných i dlouhodobých měření průběžně probíhá v rámci výše uvedeného projektu. Proto jsou zde dané prvky, zařízení a metody zmíněny, ale dále neřešeny. Jsou totiž součástí celého tohoto projektu.

4.1 PROVEDENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

Důležitou částí experimentu je i správný návrh čerstvého betonu, protože ten ovlivňuje průběh smršťování a pro účely experimentu je nutné mít při každém opakování, pokud možno stejné podmínky, a tudíž i stejný beton. Každá složka betonu je důležitá. Vývoj smrštění je ovlivněn vodním součinitelem, zrn kameniva, poměrem cementového tmele ke kamenivu, a nakonec přísadami a příměsemi.

Následuje samotný experiment, kde se musí čerstvý beton co nejdříve uložit do příslušných měřicích zařízení. V případě prováděných experimentů se jedná o smršťovací žlaby a smršťovací kužel. Měření probíhá automaticky v klimatizované místnosti a všechny délkové a hmotnostní změny se zaznamenávají. K tomu se zaznamenávají teploty, jak ve vzorcích, tak teplota okolí.

Po 72 hodinách se vzorky vyjmou z měřicího zařízení a jsou uchovány v klimatizované laboratoři, kde se měří délkové změny přenosným deformetrem. Dále se vzorky váží pro zaznamenání hmotnostních úbytků. Pro menší prvky byl použit stojanový deformetr osazený číselníkovým úchylkoměrem s možností odečtu na 0,001.

Hodnoty se poté zpracují, kde se odstraní nepoužitelná data, jako například čidla teploterů, měří ještě před začátkem samotného měření. Tudíž na vstupu jsou teploty např. 220°C. Tyto údaje na začátku dat značí, že čidlo není zapojené v datové ústředně.

Tyto hodnoty se odstraní z měření. Z těchto dat se udělají grafy závislostí a porovnává se, jak tato data souvisí s teoretickými modely a které jevy ovlivňují smrštění nebo jak jsou s ním spjaty (teplota, hmotnostní úbytky).

U všech měřených veličin byl zaznamenán čas, počítaný od zahájení měření. Na základě časových údajů z jednotlivých datových ústředí se pak všechna data vztáhnou k jednomu počátku měření či k okamžiku smíchání cementu s vodou. Ústředny jsou již zapojené a zaznamenávají údaje před tímto okamžikem.

Jedním z výstupů diplomové práce je zpracování vlastního programu v jazyce C# .NET, který slouží pro rychlejší zpracování hrubého výstupu z měření. Měřicí ústředna dodá data ve formátu čistého textového souboru nebo excelu, kde jsou jednotlivé sloupce označeny vnitřní zkratkou měřicí ústředny. Jelikož se měří zvlášť délkové změny a zvlášť teploty, a to dokonce v jiném časovém intervalu, program tyto hodnoty dá dohromady a teploty či délkové změny v mezechasech interpoluje. Toto značně urychlí práci, a základní zpracování dat provede rychle a sám do jednoho souboru excel, kdy tento krok je v podstatě otázkou několika kliknutí.

4.1.1 Čerstvý beton

Pro účely experimentu byl vyroben jemnozrnný beton/malta s maximálním zrnem kameniva 2 mm. Pro jeho výrobu byl použit normový křemenný písek CEN-EN-196-1, Portlandský cement CEM I 42,5 R a voda v poměru 3:1:0,5. Návrh složení vycházel z normy pro zkoušení cementu ČSN EN 196-1. Zpracovatelnost byla stanovena zkouškou rozlití v souladu s normou ČSN EN 1015-3. Základní informace o vlastnostech čerstvého kompozitu jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 Složení čerstvého betonu v experimentálním měření

Označení betonu	Složení [P:C:W]	w/c [-]	Zpracovatelnost [mm]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
A	3:1:0,5	0,5	150	2200

Vzhledem k tomu, že návrh betonu vycházel z normy pro zkoušení cementu a pro výrobu byl použit normalizovaný písek, balený po pytlících vážících 1350 g (1 pytlíček pro výrobu 1 trojice zkušebních těles), byl potřebný objem betonu přepočítán s ohledem na potřebný počet pytlíků s pískem. Tím se odstranila pracná homogenizace písku a eliminovala chyba navažování písku. Zbývající složky pak byly naváženy v příslušném poměru na laboratorních váhách s přesností vážení na 0,01 g. Váha se před vážením

jednotlivých složek vynulovala (tare) s položenou nádobou, aby se vážila daná složka betonu.



Obr. 24 Složky betonové směsi připravené na namíchání

Při míchání byl dodržován přesný postup dávkování jednotlivých složek, stejně tak jako byly dodrženy předem stanovené doby míchání. Jako první se smíchal cement s vodou (zaznamenal se čas – začíná proces hydratace). Jakmile byla celá dávka cementu rozmíchána s vodou, začalo se za stálého míchání přisypávat kamenivo. Tento čas se také zaznamenal, jelikož v tento moment se začíná značně měnit reologie čerstvého betonu, což souvisí s jeho zpracovatelností. Další následující kroky je třeba udělat v patřičném časovém rozpětí, aby nedošlo k podstatné změně zpracovatelnosti betonu v čase a aby vyrobená sada zkušebních těles byla co nejvíce stejnorodá a aby byl co nejmenší časový rozdíl v zahájení měření u jednotlivých těles (vzhledem k okamžiku smíchání cementu s vodou).



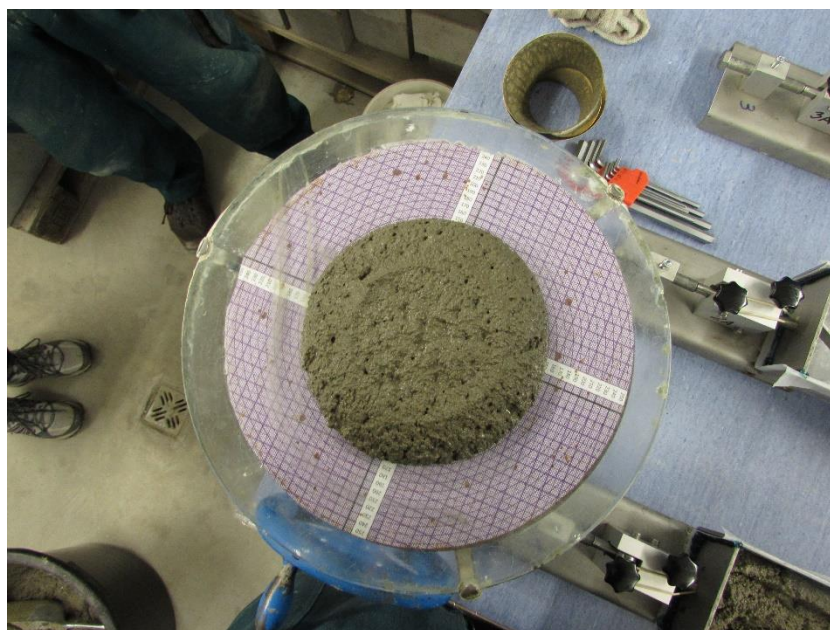
Obr. 25 Přisypávání kameniva za stálého míchání a hotová betonová směs

Směs je nyní připravena pro plnění měřicího ústrojí. Zároveň s plněním se udělala zkouška rozlitím dle normy ČSN EN 1015-3, která slouží pro ověření konzistence u malt. Průběh je na Obr. 26, kde je zdokumentován stručně průběh zkoušky [23].



Obr. 26 Průběh zkoušky rozlitím betonu

Zkouška proběhla korektně, čerstvý beton nevykazoval známky segregace ani odlučování vody (viz Obr. 27). Průměrná hodnota rozlití je uvedena v Tab. 4 (sloupec zpracovatelnost).



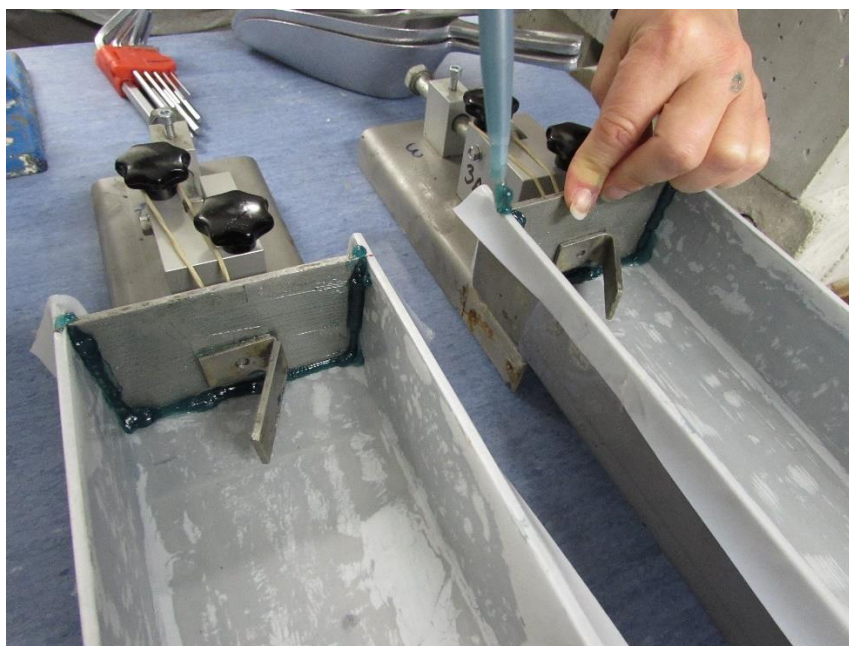
Obr. 27 Výsledek zkoušky rozlitím betonu

4.1.2 Plnění měřících žlabů

Po namíchání čerstvého betonu se okamžitě začaly plnit žlaby pro samotné měření smršťování. Stěny žlabů byly pokryty teflonem, aby bylo eliminováno tření o stěny formy. Posuvná čela všech měřících žlabů byla před zahájením plnění po obvodu utěsněna vazelínou (Obr. 28), nejen aby se zachovala jejich pohyblivost, ale aby nemohla voda a cementový tmel z čerstvého betonu vytéct ven.

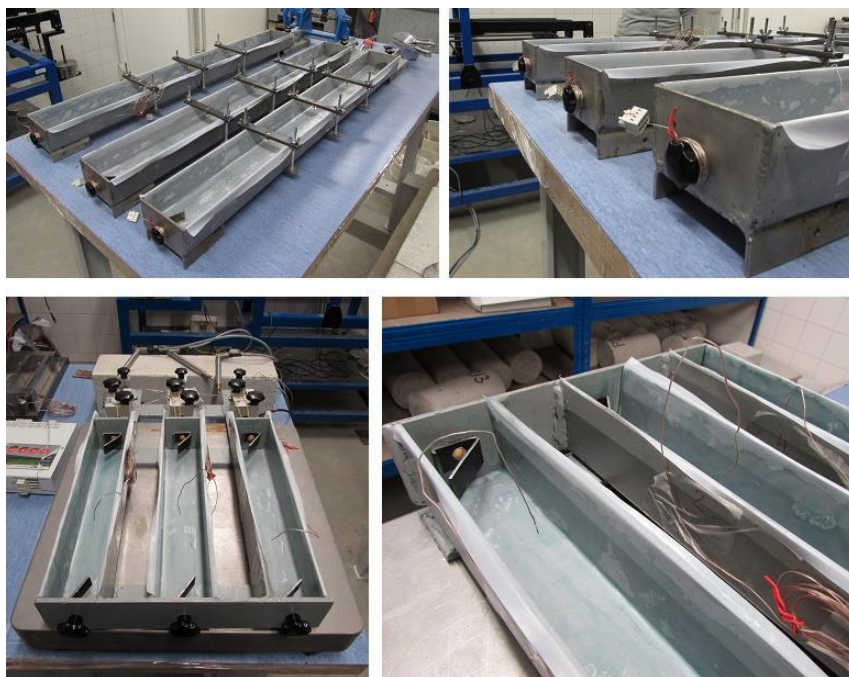
Tab. 5 Rozměry žlabů použitých v experimentu

Typ žlabu	Rozměry
Velké žlaby	100×60×1025 mm
Malé žlaby	50×50×300 mm
Smršťovací kužel	Výška: 125 mm, průměr podstavy 145 mm
Trojice zkušebních těles dle ČSN 12617-4	40×40×160 mm



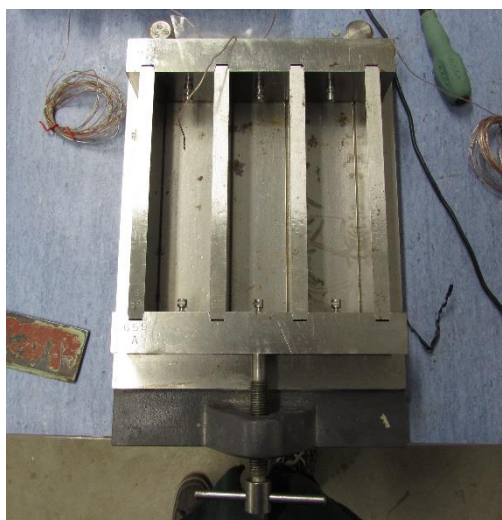
Obr. 28 Zaletování čel smršťovacích žlabů

Přípravené velké i malé žlaby jsou vidět na Obr. 29 a smršťovací kužel na Obr. 22 v kapitole 3.6.13. Na obrázcích velkých žlabů jdou vidět měřicí terče předpřipraveny v pozicích, kde bude povrch betonu. Byly fixovány v pomocných příložkách pevně dotažených k rámu žlabu.



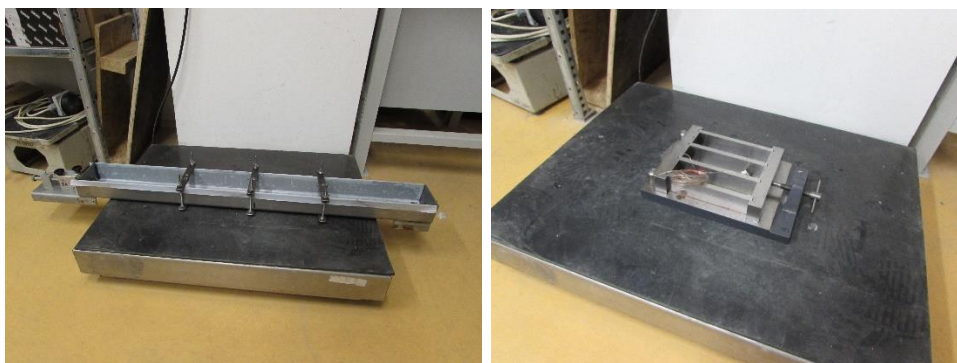
Obr. 29 Velké a malé žlaby připravené na měření

Dále kromě těchto žlabů a smršťovacího kužele byla vyrobena trojice zkušebních těles o rozměrech 40×40×160 mm pro měření smršťování jemnozrnných materiálů v souladu s normou ČSN 12617-4. Tyto trámečky sloužili pro účely srovnání výsledků získaných standardizovaným a nestandardizovanými postupy měření. Forma pro jejich výrobu je zobrazena na Obr. 30 [24].



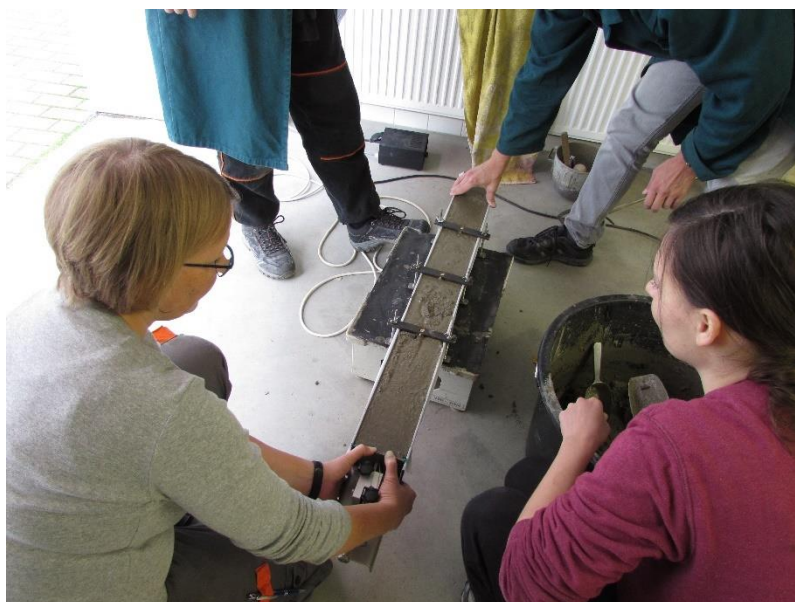
Obr. 30 Forma pro výrobu normových zkušebních těles

Pro účely výpočtů hmotnostních úbytků způsobených vysycháním zkušebních těles, byly všechny formy před a po naplnění zváženy, za účelem stanovení hmotnosti čerstvého betonu v jednotlivých zkušebních formách.



Obr. 31 Vážení žlabů

Po samotném naplnění každého žlabu se jednotlivé žlaby položil na vibrační stolek, pro správné zhutnění betonu. Plnění probíhalo postupně po vrstvách a každá se zhutnila tak, aby byl odstraněn přebytečný vzduch.



Obr. 32 Hutnění čerstvého betonu na vibračním stole

Po hutnění se zkontrolovala rozteč měřících základen. Tyto základny byly později použity po odejmutí betonových trámů z měřícího ústrojí pro měření délkových změn. Toto se dělo až po 72 hodinách, kde prvky byly uloženy v klimatizované laboratoři, kde se smršťování měřilo pomocí příložného deformometru.



Obr. 33 Kontrola rozteče měřících základen

Následně se všechny žlaby naplněné čerstvým betonem umístily na váhový stůl v laboratoři a vše je připraveno pro samotné měření experimentu.

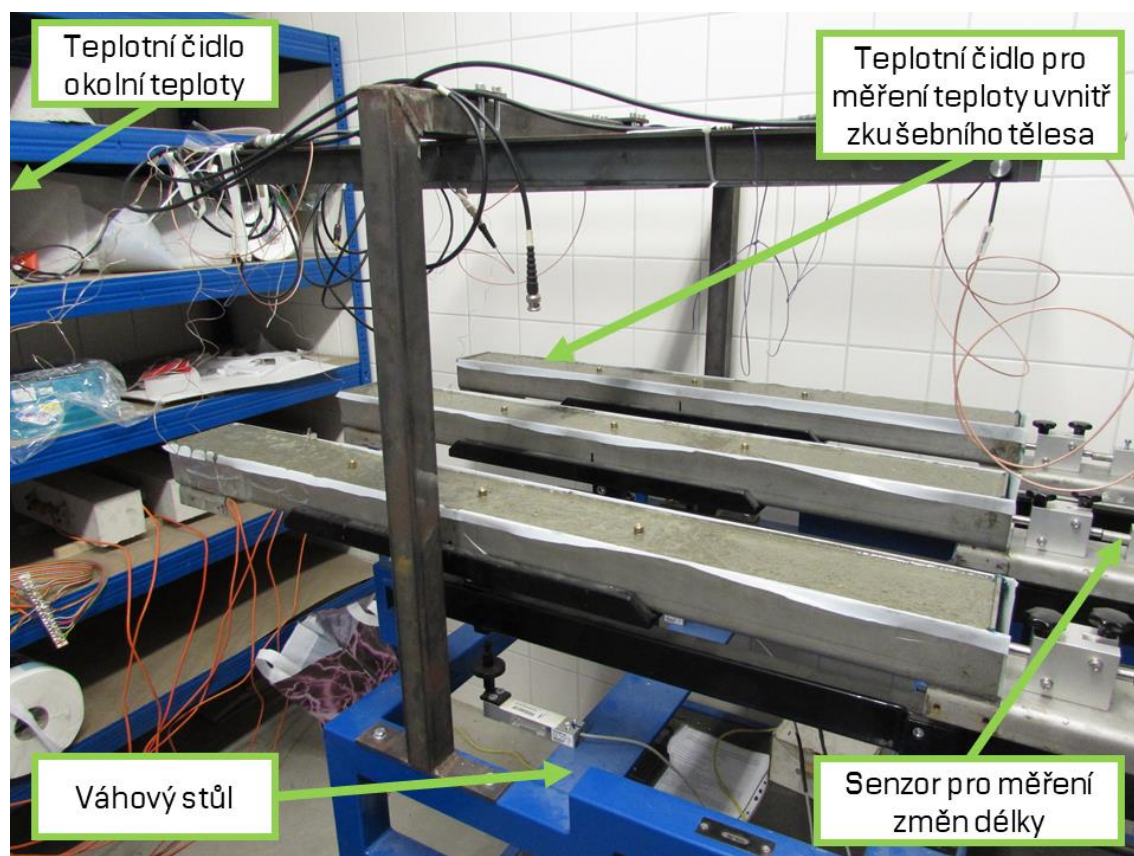


Obr. 34 Detail měřící základny

4.1.3 Umístění žlabů na váhový stůl a laboratoř

Povrch zkušebních těles nebyl záměrně ošetřován, a to z důvodu sledování hmotnostních úbytků způsobených vysycháním betonu. Laboratoř je plně klimatizována, kde se teplota udržuje na $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Do této laboratoře je po započetí měření omezen přístup na minimum a pokud možno vůbec. Do místnosti se vejde pouze ze dvou důvodů. První v případě, že by na obrazovce notebooku, kde se zobrazuje průběh měření, objevila nějaká anomálie a bylo by potřeba zkontrolovat samotné žlaby. Dalším důvodem je odformování prvků, které se měří kratší časový úsek než 72 hodin. Toto se dělo v případě doplňkových žlabů, které se měřily pouze po dobu 24 hodin.

V laboratoři se nachází váhový stůl pro souběžné měření hmotnostních úbytků a délkových změn těles vyrobených ve velkých žlabech. Ostatní měřicí zařízení včetně malých žlabů jsou uložena na masivním a stabilním stole. Malé žlaby jsou současně postaveny na váze, která umožňuje automatický záznam hmotnostních úbytků zkušebních těles. Dále stůl s ostatními žlaby a smršťovacím kuželem. Měřicí ústředna s notebookem, který zaznamenává data z ústředny. Laboratoř lze vidět na Obr. 35.



Obr. 35 Popis váhového stolu velkých žlabů

Žlaby mají zhruba uprostřed výšky zkušebních tělesa umístěné čidlo pro měření teploty. To lze vidět na Obr. 29 v dolním pravém obrázku. Žlaby jsou na obrázku připraveny na betonovou směs, avšak takto lze vidět i přibližná poloha čidla uvnitř betonu. Další čidlo je umístěno volně ve vzduchu pro měření okolní teploty. Jeden z velkých žlabů má i čidlo venku na povrchu konstrukce žlabu, pro měření teploty samotného žlabu.

Velké žlaby se uloží na váhový stůl. Tato část je poměrně pracná a vyžaduje několik lidí, z důvodu velikosti a hmotnosti žlabů, dále velikosti celého měřicího zařízení, kde člověk musí manévrovat ve stísněném prostoru.



Obr. 36 Osazování velkých žlabů na váhový stůl

Po osazení všech tří velkých žlabů se musí váhový stůl nastavit do měřicího rozsahu. Měřicí přístroj pro měření hmotnostních úbytků má rozsah měření max. 3 kg. Váhový člen se nastavuje přibližně doprostřed jeho měřicího rozsahu. To se provádí pomocí různých velkých protizávaží a pro jemnější vyvážení se používá posuvné závaží na tyči, která je podélně se žlabem.



Obr. 37 Vyvažování měřicího ústrojí velkých žlabů pro správné měření hmotnostních úbytků

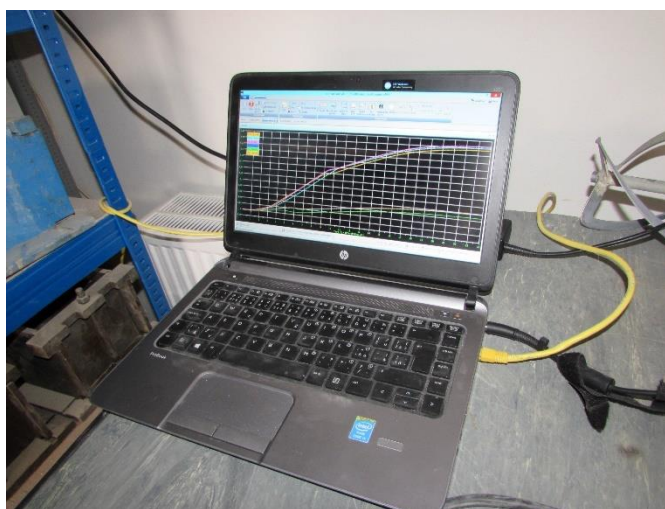
Jakmile je vše na svém místě, zkontrolují se všechny kabely a čidla, zda jsou správně zapojeny a může se začít s měřením. Měření teplot započalo ihned po naplnění žlabů,

kdežto měření deformací a hmotnostních úbytků až v tento čas. Pro jistotu se tento okamžik taktéž poznamená.



Obr. 38 Hotové malé žlaby a započetí měření

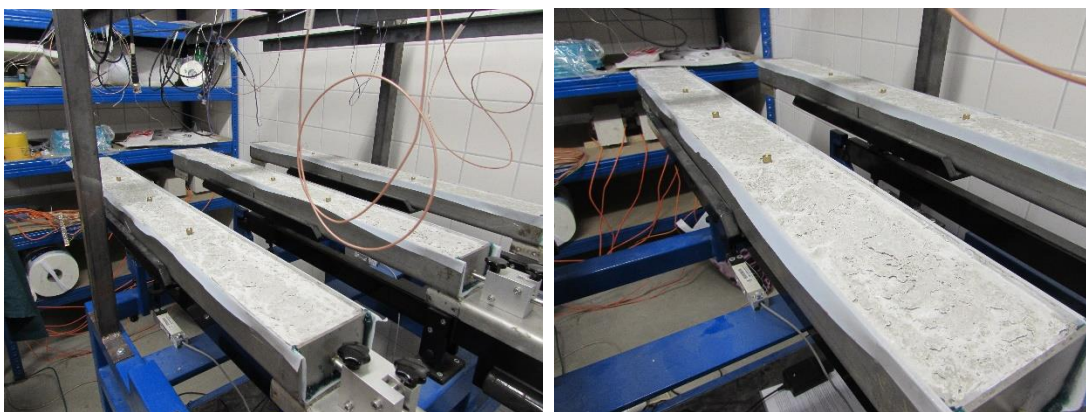
Samotný notebook je propojen s ústřednou pomocí standartního ethernetového kabelu a je ve vedlejší místnosti. To je z důvodu pravidelné kontroly probíhajícího měření. Mohou se kontrolovat průběžně, zda není někde nějaký výkyv, popřípadě zda se nějaké čidlo nepoškodilo nebo neposunulo mimo svoje měřicí místo.



Obr. 39 Notebook pro zaznamenávání hodnot měření

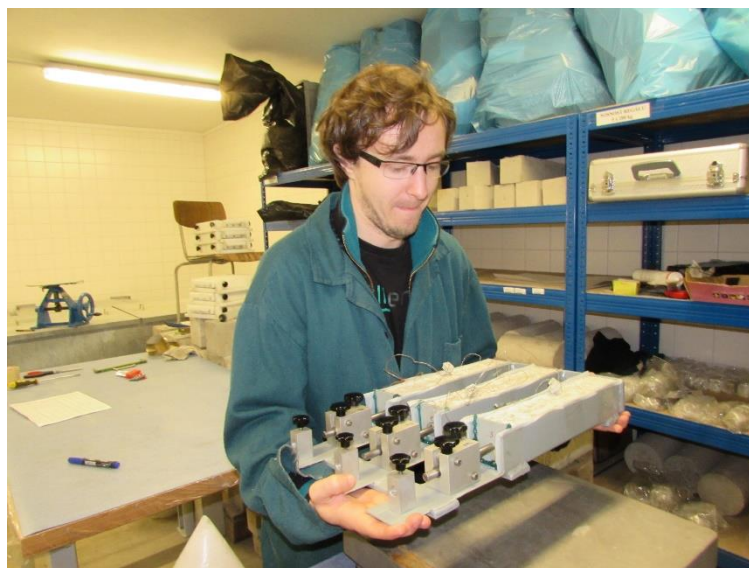
4.1.4 Měření po 72 hodinách

Po uplynutí doby 72 hodin se odpojí ústředna a přeruší všechna čidla pro měření teplot a délkových změn. Dojde ke kontrole dat v notebooku a vizuální kontrole prvků, zda nedošlo k nějakému závažnému poškození nebo chybě.



Obr. 40 Velké žlaby po skončení automatizovaného měření v laboratoři

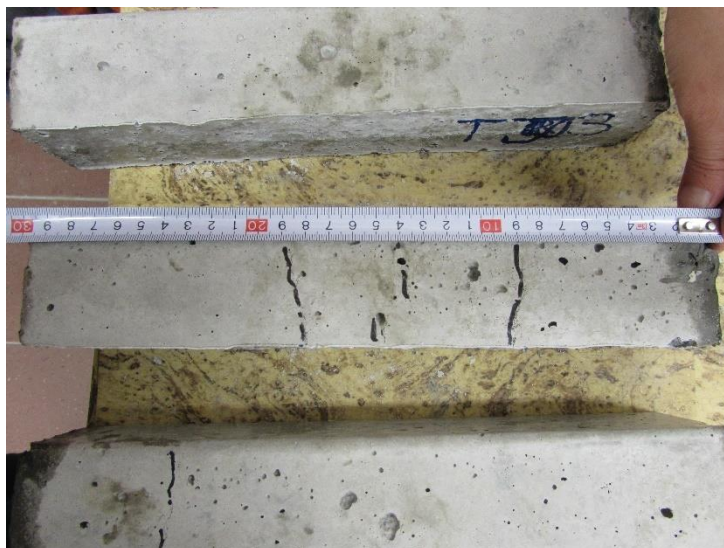
Následně se musí všechny žlaby i se vzorky zvážit. Jelikož známe hmotnost samotných žlabů, tak lze vypočítat snadným odečtem samotnou hmotnost jednotlivých vzorků. Tento údaj je použit pro samotné zpracování výsledků kdy se hledají souvislosti mezi hmotnostními úbytky a délkovými změnami a takřka jakákoliv data související se smršťováním jsou potřeba. Dále manuální zvážení slouží jako kontrola celkového hmotnostního úbytku zjištěným automatizovaným měřením.



Obr. 41 Přesun žlabů po skončení měření za plného soustředění

Následně se vzorky opatrně vyjmou ze žlabů. To je poněkud náročnější úkol, jelikož samotné prvky jsou těžké, nesmí dojít k jejich poškození. Vzorky se následně přesunou do jiné laboratoře, opět klimatizované pro uchování stálých podmínek, kde se zváží, provede se první měření příložným deformetrem, které se uvažuje jako počáteční čtení (nulová deformace) pro stanovení poměrných dlouhodobých délkových změn způsobených vysycháním. Hmotnosti a délky se zapíší do tabulky s příslušným časem.

Při prvotním měření a ukládání do laboratoře se i poznačí trhliny, které se na prvcích již vyskytují. To z důvodu, že pokud nějaké vzniknout až při samotné přítomnosti smršťování v laboratoři, bude se vědět, které. Měření a samotné vyznačené trhliny jsou na Obr. 42.



Obr. 42 Měření malých trámečků s poznačenými trhlinami

Následně se každý týden chodí do laboratoře a měří se změna délky příložným deformetrem u velkých prvků a zařízením pro měření ztvrdlých trámů a válců (stojanový deformetr) u malých trámů. Dále se každý prvek zváží a všechna data se zapíše do tabulky s datem. Prvky se ukládají pokaždé stejně do měřicího zařízení, což lze vidět na Obr. 43.



Obr. 43 Měření změny délky malého trámečku stojanovým deformetrem

Číselná značka u trámečku byla použita i jako vodítko, jak uložit trámeček do zařízení, aby se měřilo pokaždé stejně. V tomto případě je značka vždy nahoře vlevo a prvek je čelem ven ze zařízení.



Obr. 44 Vážení malého trámečku v druhé laboratoři

Před a po měření se provede kontrolní měření na kontrolní tyči. Tento postup slouží ke kompenzaci okolních vlivů vůči počátečnímu čtení (okolní vliv je například změna teploty v laboratoři). V případě přenosného deformetru se přeměřují hroty na kalibrační tyči z invarového materiálu. Tento materiál má výhodu, že jeho součinitel teplotní roztažnosti je velmi malý, tudíž v případě teploty v laboratoři a jejích výkyvů ± 2 °C je roztažnost materiálu zanedbatelná.



Obr. 45 Deformetr v krabici s kalibrační tyčí

Pomocí této tyče se na digitálním úchylkoměru nastaví nula. Samotná práce s deformetrem musí být velmi opatrná, jelikož samotné zařízení je citlivé. Už z tohoto důvodu se deformetr nikdy nepokládá volně na stůl, ale vždy se drží za kovová madla a v případě položení se pokládá do krabice, kde drží na těchto zmíněných madlech a hroty jsou tím pádem volně ve vzduchu. Deformetr v krabici plus kalibrační tyč dole lze vidět na Obr. 45.

Zařízení pro měření ztvrdlých trámů a válců se kompenzuje opět pomocí etalonu vyrobeného z ocelové tyče s mosaznými koncovkami. Tato tyč se vloží do zařízení vždy stejným způsobem. Proto je na jednom konci označená, aby se vědělo, kterým koncem se má dát nahoru a ven ze zařízení. Tato tyč se musí držet v ruce co nejkratší dobu, jelikož teplota lidského těla ji ohřeje, a to může ovlivnit měření.



Obr. 46 Velké prvky uložené v druhé laboratoři za stálé teploty

4.1.5 Úskalí měření a experimentů

Z popisu celého experimentu si pozorný čtenář může všimnout úskalí, která mohou nastat. Obecně nic není dokonalé a jakékoliv experimenty budou mít vždy nějakou formu chyby. Důležité je všechny možné chyby, pokud možno eliminovat, popřípadě je mít přítomné v zanedbatelné míře. Dále je potřeba mít vyřazeny všechny způsoby zabarvení experimentu ze strany lidí pracujících na něm.

4.1.5.1 Čerstvý beton

Čerstvý beton musí být při každém experimentu stejné složení. Složení i časy namíchání musí být pečlivě zaznamenány. Pakliže se bude provádět další experiment, pro statistické

účely by jiný beton nemohl vykázat stejné výsledky. Při míchání čerstvého betonu se dbá nejen na složení, ale jakýkoliv zásah člověka, je nutné, pokud možno eliminovat.

Samozřejmě jelikož se jedná o „špinavou“ práci, nikdy nemůžeme vše eliminovat a zásah člověka v tomto případě být musí. Toto kritérium platí obecně ve vědecké oblasti, kdy se požaduje co nejmenší zabarvení ze strany člověka, aby na výstupu byla čistá data okleštěná od vnějších vlivů. Jediný vliv by měl být ten, který zkoumáme. Proto v ostatních experimentech napříč vědou se dělají dvojité zaslepené experimenty, kdy existuje kontrolní skupina, která není pod vlivem daného jevu.

Tato věc se v případě popsaného experimentu v této diplomové práci dělat nemusí, jelikož se zkoumá smrštění jako takové. V případě, že bychom například zkoumali nějaký plastifikátor a chtěli vědět, jak ovlivňuje smrštění, v takovém stavu bychom zkoumali i beton bez něj, abychom mohli porovnat, jak tento plastifikátor ovlivnil smrštění.

4.1.5.2 Žlaby

Žlaby jsou vybaveny teflonem a jejich posuvné čelo je utěsněno vazelínou. Chceme v tomto případě co nejmenší ovlivnění smrštění ze strany měřicího zařízení (žlabů). Ovlivnění lze vidět v deformacích při odformování, kdy těleso, které nabývá se více rozpírá do stěn žlabu. V kombinaci nerovnoměrného vysychání se pak při odformování stává, že se těleso po vyjmutí mírně natáhne.

Teplotní čidlo je záměrně zhruba uprostřed betonového tělesa, aby měřilo teplotu uvnitř betonu. Na povrchu by tato teplota mohla být ovlivněna okolními vlivy a teplotou.

V případě smršťovacího kužele (Obr. 22) nesmí být fotografován s bleskem z důvodu snímání zařízení laserem. V tomto případě by se na výstupu vyskytl opět údaj mimo měřitelné pole. Pro jistotu na fotografii nebyl použit blesk, a to i v případě, že měření ještě nezačalo.

4.1.5.3 Podmínky v laboratoři

V laboratoři musí být neustále stejné podmínky. Je omezen pohyb lidí na minimum, jelikož čidla jsou velmi citlivá. Pokud například člověk vejde a otevře dveře, samotné otevření dveří vytvoří průvan a ten ovlivní teplotní čidlo. Pokud to v ten moment sepne měření, může se na výstupu dat objevit teplota např.: -150 °C. V takovém případě bychom naměřili „nesmyslnou“ hodnotu. To je jeden z důvodů, proč je omezen pohyb lidí v laboratoři na minimum. Další důvod je z důvodu klimatizace, aby teplota byla neustále regulována a nevznikal by průnik teploty z vedlejší místnosti a spínání klimatizační jednotky, která udržuje předem nastavenou teplotu.

Dalším jevem jsou otřesy, které by mohly ovlivnit data hmotnostních úbytků. Jakékoliv otřesy mohou vzniknout pohybem lidí, přesouvání předmětů nebo v nejhorším případě dotykem či zavaděním o samotný váhový stůl.

4.1.5.4 Měření po 72 hodinách a manipulace s prvky

Při manipulaci s prvky je nutné dbát nepoškození prvků. To by ovlivnilo jejich délku a hmotnost, což by znamenalo chybu měření. Dále je nutné prvky vážit vždy na vytárované váze a ukládat je do měřících zařízení správně. To se děje pomocí značek, kdy se menší prvky dávají značkou nahoru a dopředu. Velké prvky je nutné měřit vždy ve stejném pořadí, proto jsou měřící základny očíslovány (lze vidět na Obr. 46), aby nedošlo k omylu.

4.1.5.5 Závěr

Jak lze z popisu experimentů a všech úskalí vidět, je tu hodně věcí, na které se musí dávat pozor a které mohou dělat problémy, pokud se nedodrží. Všechny části a data se dokumentují, aby mohlo dojít k opakování experimentu jak zde, na Ústavu stavebního zkušebnictví, tak někým jiným, kdo by si chtěl data ověřit. To je také důvod, kdy musí být beton vždy stejný a poměr jednotlivých složek je zdokumentován. Stejně tak separační fólie, které jsou použity ve žlabech, tak rozměry žlabů. Všechny tyto prvky ovlivňují průběh experimentu.

Dále je snaha o to, aby samotní experimentátoři jak chtěně či nechtěně nemohli ovlivnit experiment, aby vyšel dle jejich předpokládání či přání. V případě experimentů v této diplomové práci je tento jev malý, jelikož se nejedná o experimentech na lidech či nějakém sociálním uskupení, kde se výsledky hodnotí např. slovně, ale stát se to může a je potřeba si zachovat neutralitu při každém experimentu a jeho vyhodnocování.

4.2 NAMĚŘENÁ DATA

Program, který zpracovává data z ústředny do notebooku, dodá jedna data jako textový dokument a druhá jako tabulku excelu. Excel se zdá v tomto případě jako přijatelný, ale ve skutečnosti mezi těmito výstupy není velký rozdíl. Textový dokument má data oddělené tabulátory, a když si je uživatel zkopíruje do excelu, ten mu je sám automaticky rozdělí do sloupců, takže v tomto případě velký rozdíl mezi textovým souborem a souborem excelu je jen krok zkopírování dat z textového souboru do tabulek.

The left window displays a text file with the following content:

```
13. 10. 2017
09:08

Time 1 - default sample rate CH=1      m_1 CH=4      m_2
s      g      g      mm      mm      mm      s
13. 10. 2017-09:06      13. 10. 2017-09:06      13. 10. 2017-09:06

T0 =17. 10. 10 10:41:54 T0 =17. 10. 10 10:41:54 T0 =17. 10. 10 10:41:54
dt =10000 ms      dt =10000 ms      dt =10000 ms      dt =10000 ms
CH 0      CH 1      CH 2      CH 3      CH 4      CH 5      CH 6      CH 7

0      -0,09113      0,04989 -0,09699      0,000 -0,00043
9,969 -0,1014 0,06737 -0,04225      0,000 -0,00043
19,99 -0,1146 0,08339 -0,04318      0,000 -0,00051
30,00 -0,1373 0,08819 -0,05069      0,000 -0,00058
39,99 -0,2209 0,07379 -0,06824      0,000 -0,00066
59,02 -0,2418 0,07880 -0,08245      0,000 -0,00074
59,99 -0,2505 0,08587 -0,1009 0,000 -0,00081 0,000
70,02 -0,2692 0,09093 -0,1126 0,000 -0,00088 0,000
79,99 -0,2781 0,08303 -0,1136 -0,00010 -0,00094
90,00 -0,2980 0,1006 -0,1086 -0,00011 -0,00102
99,99 -0,2472 0,08527 -0,1276 -0,00013 -0,00107
110,00 -0,2581 0,09171 -0,1425 -0,00014 -0,00114
119,99 -0,2682 0,1020 -0,1417 -0,00014 -0,00118
```

The right window shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G
	DATUM	VYPADEK	T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	T5 °C
1							
2							
3							
4							
5	10.10.2017	09:08:00	NEPRAVDA	171,6	225,0	19,8	228,5
6	10.10.2017	09:09:00	NEPRAVDA	173,2	212,5	19,9	232,1
7	10.10.2017	09:10:00	NEPRAVDA	171,4	220,0	20,1	223,9
8	10.10.2017	09:11:00	NEPRAVDA	173,3	224,1	20,1	232,3
9	10.10.2017	09:12:00	NEPRAVDA	171,4	219,5	19,9	223,7
10	10.10.2017	09:13:00	NEPRAVDA	168,9	223,6	20,0	223,8
11	10.10.2017	09:14:00	NEPRAVDA	172,4	225,3	20,0	230,5
12	10.10.2017	09:15:00	NEPRAVDA	175,2	210,3	20,0	224,3
13	10.10.2017	09:16:00	NEPRAVDA	171,1	227,3	19,9	227,9
14	10.10.2017	09:17:00	NEPRAVDA	174,0	222,2	19,9	235,9
15	10.10.2017	09:18:00	NEPRAVDA	174,2	227,9	20,2	224,8
16	10.10.2017	09:19:00	NEPRAVDA	174,8	218,4	20,3	222,8
17	10.10.2017	09:20:00	NEPRAVDA	171,8	221,2	20,3	227,8
18	10.10.2017	09:21:00	NEPRAVDA	174,6	216,9	20,0	230,7
19	10.10.2017	09:22:00	NEPRAVDA	175,3	223,4	19,9	229,8
20	10.10.2017	09:23:00	NEPRAVDA	169,7	227,7	19,9	227,9
21	10.10.2017	09:24:00	NEPRAVDA	169,6	220,7	20,2	226,4
22	10.10.2017	09:25:00	NEPRAVDA	174,4	225,6	20,2	220,6
23	10.10.2017	09:26:00	NEPRAVDA	173,7	227,5	20,0	231,0
24	10.10.2017	09:27:00	NEPRAVDA	172,8	225,3	19,3	219,7
25	10.10.2017	09:28:00	NEPRAVDA	173,9	222,2	19,3	218,7
26	10.10.2017	09:29:00	NEPRAVDA	166,1	223,9	19,3	223,1
27	10.10.2017	09:30:00	NEPRAVDA	172,2	219,9	19,4	227,9

Obr. 47 Ukázka hrubých dat hmotností, délkových změn (vlevo) a teplot z výstupu měření (vpravo)

Veškerá data a jejich zpracovaná podoba jsou k dispozici u realizátora grantového projektu.

4.3 ZÁKLADNÍ ZPRACOVÁNÍ DAT

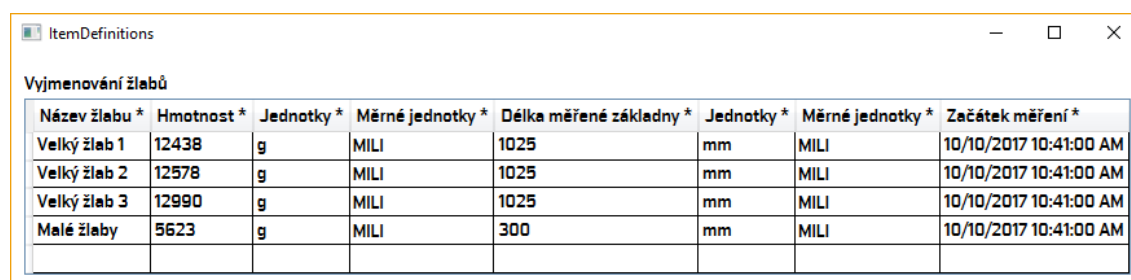
Na Obr. 47 je vidět ukázka těchto výstupů. Můžeme si všimnout, že tento výstup je opravdu bez žádných komentářů, bez nějakého dobrého zpracování, a i názvy sloupců jsou jen označení vstupů do měřicí stanice.

V případě ručního zpracování je tato činnost relativně pracná. Je nutné si vše nakopírovat do excelu a pak po sloupcích přesouvat jednotlivá data. Po této práci uživatel bude mít jen čistá data přiřazená k jednotlivým žlabům. Teprve tehdy je může nějak vyhodnocovat a počítat s nimi. Vzhledem k tomu, že indukční snímač zaznamenává změnu délky v milimetrech, je pro získání poměrného přetvoření nutné všechny hodnoty délkové změny vydělit měřicí základnou, v tomto případě délkou žlabu neboli vzdáleností čel žlabů.

Další, větší, oříšek je dát dohromady data z obou souborů. Jde totiž o rozdílné časy a periody, kdy se data měří. Textový soubor dat s délkovými změnami a úbytky hmotností má 25394 řádků. Jednotlivé řádky dat se zaznamenávají v tomto případě zhruba každých 10 sekund. Jakmile se jedná o 72 hodinové měření, dat je opravdu hodně. Na druhou stranu data s teplotami, tabulka excelu, se měří každou minutu, tudíž obsahuje „jen“ 4330 řádků.

4.3.1 Program pro zpracování dat

Pro tuto část byl v rámci řešení diplomové práce vytvořen jednoduchý program s GUI (Graphical User Interface – grafické uživatelské rozhraní), kde si uživatel může lehce definovat jednotlivé žlaby, k nim přiřadit jednotlivé sloupce dle jejich zkratk v souboru. Dále si označí, které sloupce jsou použity pro výpočty a které jsou jen jako doplněk, popřípadě zda je nějaký sloupec přiřazen ke všem žlabům (jako například okolní teplota). Program pak následně všechna tato data zpracuje a každý žlab zvlášť umístí do listu v excelu, který následně uloží.



ItemDefinitions

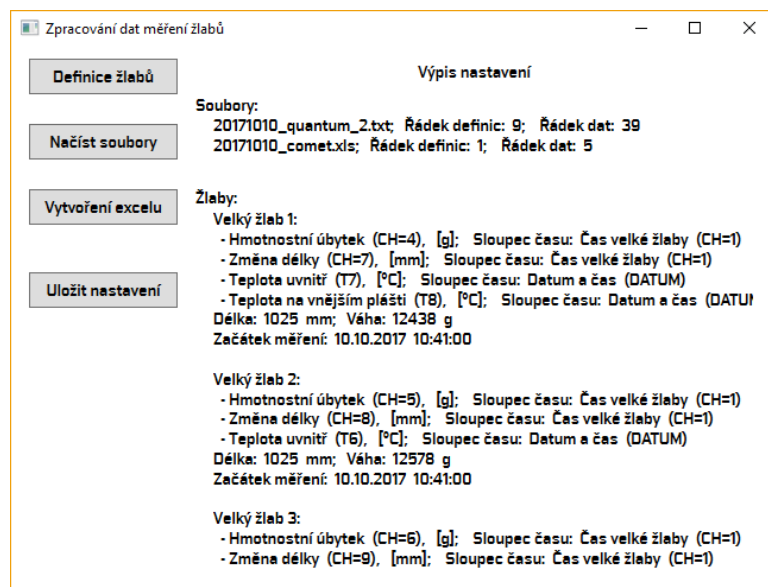
Vyjmenování žlabů

Název žlabu *	Hmotnost *	Jednotky *	Měrné jednotky *	Délka měření základny *	Jednotky *	Měrné jednotky *	Začátek měření *
Velký žlab 1	12438	g	MILI	1025	mm	MILI	10/10/2017 10:41:00 AM
Velký žlab 2	12578	g	MILI	1025	mm	MILI	10/10/2017 10:41:00 AM
Velký žlab 3	12990	g	MILI	1025	mm	MILI	10/10/2017 10:41:00 AM
Malé žlaby	5623	g	MILI	300	mm	MILI	10/10/2017 10:41:00 AM

Obr. 48 Ukázka programu pro zpracování dat: Definování žlabů a jejich vlastností

Program umí číst jak data z textového souboru, tak z excelu a při jejich načtení má uložená defaultní nastavení daných souborů. Například v textovém souboru začínají data až na 39. řádku, kdežto v excelu už na 5. řádku. Uživatel může načíst teoreticky neomezený počet souborů, žlabů a sloupců. Pokud by uživatel nechtěl provádět výpočet, kromě určení, že sloupec je délková změna, hmotnost nebo teplota je možnost zvolit „ostatní“ a program se k němu chová takovým způsobem, že patří k danému žlabu, ale nijak jinak sloupec k žádným výpočtům nepoužívá.

Program dále umožňuje si uložit veškeré nastavení, které jednou uživatel zadá. V případě opakování experimentu a neprovedení žádné velké změny, může uživatel pouze nahrát nastavení a změnit jen některá data, jako například hmotnost vzorků, čas počátku měření atp.



Obr. 49 Ukázka programu pro zpracování dat: Výpis veškerého nastavení před vytvořením excelu

4.3.1.1 Výpočet při zpracování dat

Kromě přiřazení hodnot z různých souborů k jednotlivým žlabům program provede i několik základních výpočtů, které se musejí provést v každém případě vyhodnocování dat. Jako první přepočítá délkovou změnu na poměrné přetvoření zkušebního tělesa. Rovnice (11) ukazuje výpočet poměrného přetvoření zkušebního tělesa s převodem jednotek z milimetrů na metry a dále přepočet na délku měřicí základny l_0 .

$$\varepsilon_c = \Delta l \text{ (m)} \cdot \frac{1}{l_0 \text{ (m)}} \quad (11)$$

Kde:

- Δl – naměřená změna délky (m)
- l_0 – délka měřeného tělesa (m)
- ε_c – naměřené poměrné přetvoření (m/m)

Další výpočet se týká čistého smršťování betonu. V tomto případě je nutno od naměřených poměrných přetvoření odečíst poměrné přetvoření vlivem teplotní roztažnosti betonu a případné poměrné přetvoření vlivem teplotní roztažnosti měřícího zařízení (to se v této práci neuvažuje). Takto jsou poměrná přetvoření „očistěna“ od vlivu teploty. Pro každou hodnotu v řádku dat byl proveden výpočet dle rovnice (12).

$$\varepsilon_{c, \text{clean}} = \varepsilon_c - \varepsilon_{c, \text{tep}} - \varepsilon_{z, \text{tep}} \quad (12)$$

Kde:

- ε_c – naměřené poměrné přetvoření upravené dle rovnice (11) (m/m)

- $\varepsilon_{c,tep}$ – poměrné přetvoření betonu od teploty dle rovnice (14) (m/m)
- $\varepsilon_{z,tep}$ – poměrné přetvoření žlabu od teploty (m/m)
- $\varepsilon_{c,clean}$ – „očistěné“ poměrné přetvoření prvku od smrštění (m/m)

Pro provedení korekce je nutné vzít teplotní roztažnost oceli a betonu. Teplotní roztažnost oceli je obecně známá a používá se v stavební praxi jako $\alpha_s = 1,2 \cdot 10^{-5} [1/K]$. Teplotní roztažnost betonu lze najít v různém rozmezí. Obecně je uvažována délková teplotní roztažnost betonu rovna $\alpha_c = 1,0 \cdot 10^{-5} [1/K]$ [4].

V případě experimentů provedených v rámci této práce nelze součinitel teplotní roztažnosti betonu uvažovat jako konstantu, jelikož teplotní roztažnost v raném stáří betonu je proměnlivá v čase zrání betonu. S časem se teplotní roztažnost blíží výše zmiňované hodnotě $\alpha_c = 1,0 \cdot 10^{-5} [1/K]$. V případě experimentů se měří smrštění betonu v podstatě od okamžiku zrání, a tudíž je tento efekt potřeba započítat. Pro provedení korekce byla v rámci práce použita aproximace docenta Petra Frantíka z VUT Fakulty Stavební založená na datech publikovaných v [25].

$$\alpha_T(t) = a \cdot e^{bt} + c \quad (13)$$

Kde koeficienty a , b , c odpovídají níže uvedeným hodnotám (převedeny na metrovou změnu délky):

- $a = 61,281 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
- $b = -0,159 s^{-1}$
- $c = 11,067 \cdot 10^{-6} K^{-1}$

Výsledné poměrné přetvoření betonu od teploty je zobrazeno v rovnici (14).

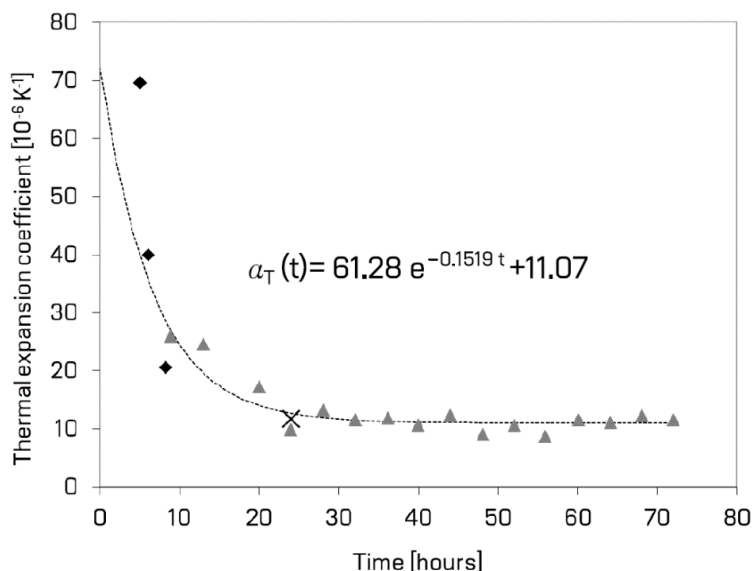
$$\varepsilon_{c,tep} = \frac{\alpha_T(t) \cdot l_0 \cdot \Delta t}{l_0} \quad (14)$$

Kde:

- $\alpha_T(t)$ – teplotní roztažnost betonu z rovnice (13) (m/(m·K))
- t – čas od okamžiku namíchání čerstvého betonu (h)
- l_0 – délka prvku (m)
- Δt – rozdíl teplot (K)
- $\varepsilon_{c,tep}$ – poměrné přetvoření betonu od teploty (m/m)

Z Obr. 50 je vidět, že ustálení teplotní roztažnosti betonu je kolem 30 hodiny. Měření probíhá v prvních 72 hodinách, 30 hodin je v podstatě 40 % měřeného času v laboratoři.

Zde vidíme hlavní důvod, proč se nemůže tento okamžik zanedbat a zvlášť v případě, kdy je předmětem experimentu měření smršťování, kde teplotní roztažnost tuto hodnotu ovlivňuje.



Obr. 50 Aproximace koeficientu teplotní roztažnosti betonu (Převzato z [25]).

4.3.1.2 Základní funkčnost programu

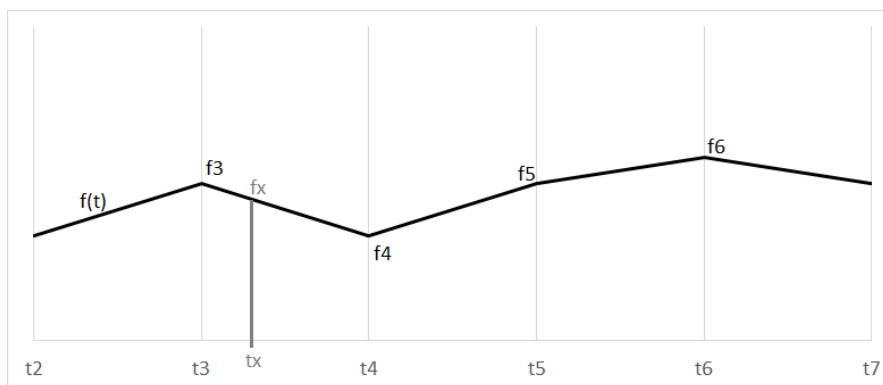
Jako první uživatel definuje žlaby, které se v měření vyskytují. Určí jejich vlastnosti (délka, hmotnost atp.). Následně začne definovat soubory. V každém souboru uživatel zadá sloupce pro čas a označí je příslušnou hlavičkou, pod kterou se nachází v souboru. Následně zadá sloupce hodnot, kde opět zadá název jejich hlavičky, typ dat (změny délek, teploty, hmotnostní úbytky nebo ostatní). Přiřadí k datům jejich sloupec času (některé sloupce mohou mít vlastní sloupec času, rozdílný od jiných) a přiřadí, zda daný sloupec hodnot patří ke konkrétnímu žlabu nebo zda je univerzální a má být přiřazen ke všem (jako například okolní teplota). Po těchto operacích proběhne kontrola uživatelem, kde uvidí, co vše zadal a který sloupec se ke kterému žlabu přiřadí. Pak jen může vytvořit výsledný dokument excel.

Před samotným vytvořením dokumentu s výsledky se otevře okno, kde má uživatel možnost zvolit si, kolik hodnot (řádků) bude mít výsledná tabulka. Jsou tři možnosti: automaticky, zadat počet řádků anebo zadat časový interval. Podrobnější popis k nalezení dále.

Při vytváření výsledného souboru dochází nejprve k načítání dat ze souborů. Program si načte všechny hodnoty do sloupců, ke kterým náleží i jejich časové hodnoty (tzn. program má uložený řádek jako dvojici čas – X a hodnotu – Y). Po načtení všech hodnot projede

napříč vnitřně všechny žlaby a všechny načtené sloupce přiřadí ke korespondujícím žlabům. Nyní má k dispozici u každého žlabu všechny hodnoty, které k němu náležejí.

Nyní nastává vytváření interní tabulky. Při jejím vytváření program řeší i výše zmiňovaný problém, přiřazování hodnot z obou souborů, kde jsou rozdílné intervaly měření a tím pádem i markantně rozdílný počet dat ve zhruba stejném časovém úseku (25394 řádků pro hmotnostní úbytky se změnami délek a 4330 pro teplotní záznamy). Nyní se program rozhodne na základě volby uživatele při vytváření dokumentu. Pokud uživatel zvolil automatický počet řádků, tak jako první program vybere nejdelší časový úsek ze všech souborů a ten používá jako hlavní čas. Tento časový úsek je, jak bylo již řečeno, uložen jako sloupec časů. Je zde přítomna logika, že menší časový úsek bude z větší části (popř. dokonce i celý) v tom delším časovém úseku. Jelikož se teploty měří dříve (asi o hodinu) než změny délek a hmotností, je tento přístup výhodný. Program si takto vybere v případě této diplomové práce sloupec časů nacházející se v souboru pro teploty. V případě, že si uživatel vybere „počet řádků“, napíše do pole počet hodnot, který tabulka má mít. Program najde nejbližší a nejzazší čas a mezi nimi vypočítá časový interval, na základě počtu hodnot. Tento sloupec časů pak používá pro výpočty. Ve třetím případě, kdy uživatel zvolil a zadal časový interval (v sekundách), program opět vybere nejbližší a nejzazší čas a vytváří časový sloupec přičítáním intervalu k začátku, než dojde na konec. Program následně postupuje dle jednotlivých záznamů hlavního času a u ostatních hodnot interpoluje výslednou hodnotu pro daný čas (tzn. interpoluje hodnoty Y v daných časech). Konkrétněji je tento princip ukázán na Obr. 51. Vodorovná osa ukazuje jednotlivé časy, výšky bodů znamenají jednotlivé hodnoty. Program si pro daný čas t_x interpoluje hodnotu f_x , dle hodnot f_3 a f_4 . V případě, že daný čas bude před/po záznamech (v tomto případě před/po zahájení/ukončení měření), místo interpolace se vezme nejbližší hodnota (tzn. první nebo poslední).



Obr. 51 Princip interpolace hodnot programem

Při projíždění hodnot hlavního sloupce času se vytvoří tyto sloupce:

- i – index, pořadí řádku
- *DatumČas* – sloupec s datem a časem (takto vypadá sloupec hlavního času)
- $t [h]$ – sloupec času v hodinách (první záznam je 0 hodin)
- *všechny přiřazené sloupce danému žlabu* – název sloupce, jak zadal uživatel

Pokud uživatel zadal i konkrétní typ sloupce ve výčtu sloupců, jsou provedeny základní výpočty navíc. V případě, že daný žlab má sloupec hmotnostních úbytků, přidá se sloupec s názvem $\Delta m [\%]$, kde jsou hmotnostní úbytky převedeny na procentuální úbytek daného žlabu dle vzorce (15).

$$\Delta m = \frac{\Delta m_{vzorek}}{m_{vzorek}} \cdot 100 \quad (15)$$

Kde:

- Δm_{vzorek} – úbytek hmotnosti betonu uloženého ve žlabu (kg)
- m_{vzorek} – hmotnost čerstvého betonu uloženého ve žlabu před zahájením měření (kg)
- Δm – úbytek hmotnosti čerstvého betonu v procentech (%)

V případě, že existuje u žlabu změna délky, přidá se sloupec s názvem $\varepsilon [\mu m/m]$, kde jsou změny délek převedeny na poměrné přetvoření v jednotkách mikrostrainů dle vzorce (11) v kapitole 4.3.1.1. Pokud je přítomna jak teplota uvnitř vzorku a změna délky (tzn. jsou zde sloupce, které jsou označeny uživatelem konkrétním typem „teplota“ a jiný sloupec „změna délky“), přidá se sloupec s názvem $\varepsilon_{clean} [\mu m/m]$, což je poměrné přetvoření od smrštění očištěné od vlivu teploty. Tento výpočet je proveden dle vzorce (16). Tento vzorec je v podstatě stejný, jaký lze najít v kapitole 4.3.1.1 pod číslem (12), jenom se v této diplomové práci neuvažuje s teplotní roztažností žlabu (zmíněno i v dané kapitole u tohoto vzorce).

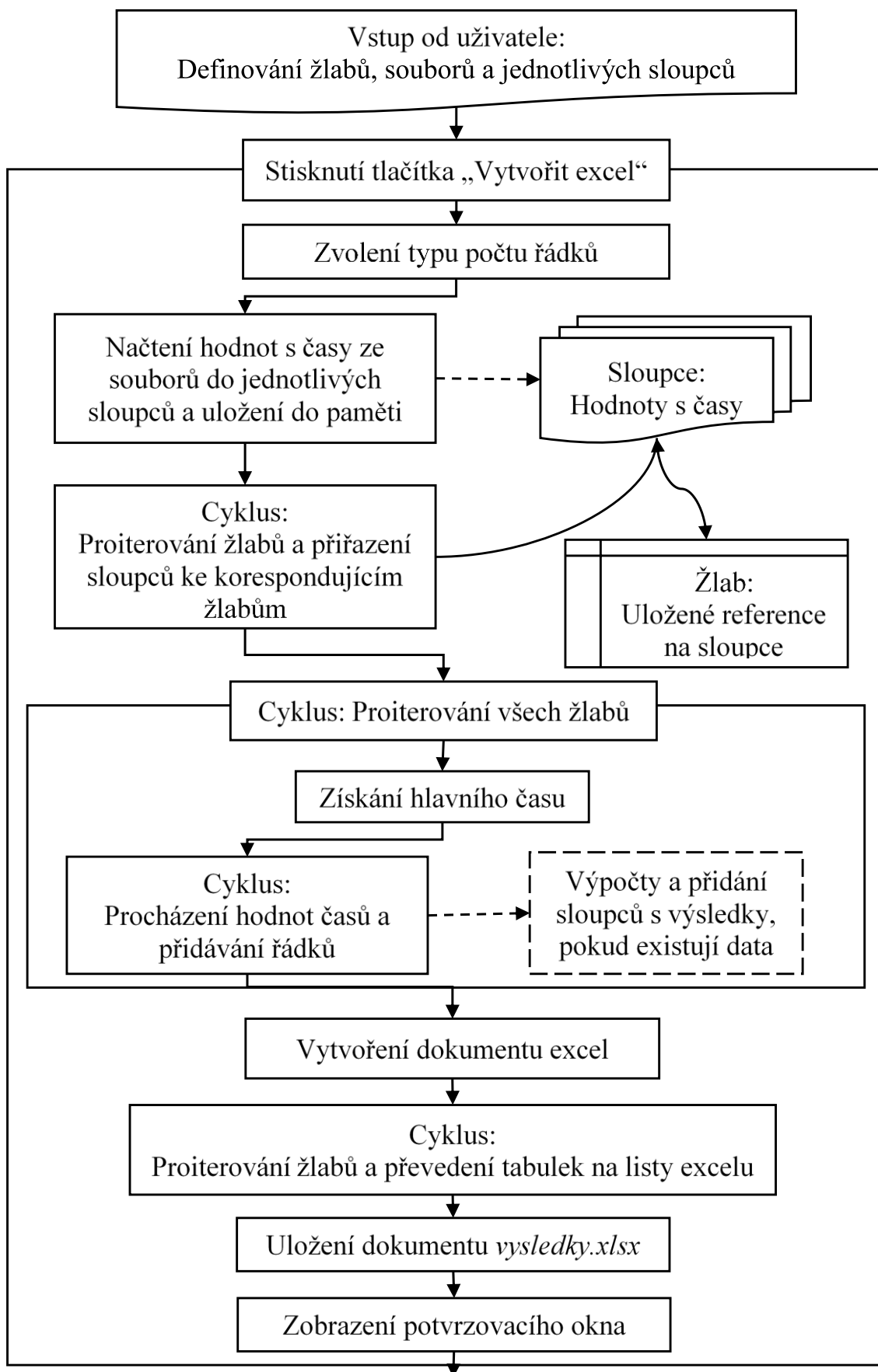
$$\varepsilon_{c,clean} = \varepsilon_c - \varepsilon_{c,tep} \quad (16)$$

Kde:

- ε_c – naměřené poměrné přetvoření upravené dle rovnice (11) (m/m)
- $\varepsilon_{c,tep}$ – poměrné přetvoření betonu od teploty dle rovnice (14) (m/m)
- $\varepsilon_{c,clean}$ – očištěné poměrné přetvoření prvku od smrštění (m/m)

Po tomto procesu má každý žlab u sebe uloženou tabulku s těmito daty a výpočty. Program zatím nefiltruje výsledky, co se týče „nesmyslných“ dat. Ty totiž musí na základě matematických vyhodnocování poznat, že je daná hodnota mimo rámec ostatních. Zde se nabízí několik možností, jak toto vylepšení udělat. Jedním z nich je proiterování jednotlivých řádků a porovnávání hodnoty s okolními řádky. Pokud je rozdíl příliš velký (zde přichází do hry otázka, jak velkou toleranci nastavit), hodnota se smaže, nebo použije sousední. Další možností je nastavení výkyvu pevně. Jako například, že teplota nemůže přesáhnout určitou hodnotu (např. teplota v betonu v případě experimentů v této diplomové práci nepřesáhne 50 °C). Nejlepším řešením bude kombinace obou výše uvedených podmínek. Funkcionalita zatím není implementována, aby se daly patřičné hodnoty najít a zhodnotit, čím tento jev nastal. V budoucnu tato filtrace v programu bude a uživatel si bude moci před vytvořením souboru říct, zda chce mít filtraci zapnutou, nebo ne.

Poslední částí algoritmu při stisknutí tlačítka na vytvoření excelu, je že se musí tabulky uložit do souboru. Program postupně proiteruje všechny žlaby a jejich interně vytvořenou tabulku uloží do excelu, kde každý žlab uloží zvlášť do listu. Nakonec celý soubor uloží do složky, kde se program nachází pod názvem *vysledky.xlsx*.



Obr. 52 Postup (algoritmus) programu při zpracovávání dat

4.3.1.3 Možná vylepšení programu

Výsledný program se může dočkat několika možných vylepšení. První z nich je, jak již bylo řečeno, že by mohl odstranit „nesmyslné“ hodnoty (např. hodnoty teplot nad 50 °C atp.). Tuto funkcionalitu navíc si bude moci uživatel povolit před vytvořením výsledného souboru.

Jako další vylepšení se nabízí sloupec počítaných dat. Jako například v tomto případě, tři malé žlaby se počítají jako jeden prvek, ale sloupce s teplotami, změnami délek jsou zvlášť (pouze hmotnostní úbytek se měří na všech třech najednou), tudíž by pomohlo, kdyby si tento fakt mohl uživatel navolit a program by pracoval se třemi žlaby najednou a bral by je jako jeden zkušební prvek. Tohoto lze částečně již dosáhnout nyní, kdy se sloupce jednotlivých malých žlabů přiřadí jednomu žlabu, s názvem například „Malé žlaby“, sloupce změn délek a teplot se přiřadí tomuto žlabu. Program je pak přiřadí do jednoho listu a uživatel to má pohromadě, musí však dodatečně provést menší úpravy v excelu.

Program je dále spíše v testovacím stavu, tudíž samotný vzhled je poněkud tristní. Po přečtení funkcionality lze vidět, že program několikrát proiteruje načtená data. Jako například program po načtení dat vytvoří interní tabulku, do ní uloží data daného žlabu i s výpočty a poté tu samou tabulku musí proiterovat ještě jednou, aby vytvořil excel. Tady by se nabízela možnost, místo interní programové tabulky rovnou vytvářet list excelu a ten pak programově přidat do souboru a ten soubor uložit.

Při zpracovávání dat a vytváření souboru neexistuje žádný ukazatel, který by zobrazoval, kolik procent je už zpracováno. Jednodušší řešení by bylo alespoň načítací animované kolečko (jako při načítání videa na webu youtube).

Všechny tyto změny pravděpodobně přijdou později, jelikož experimenty budou probíhat dále a program ulehčí jejich zpracování pracovníkům na Ústavu stavebního zkušebnictví. Dále experimentátoři budou mít zajisté své nějaké návrhy na vylepšení, takže je možné, že se programu dostane vylepšení, o kterých zde zatím není ani zmínka.

4.4 VYHODNOCENÍ DAT

V Tab. 6 je šedou barvou znázorněno zaplnění tabulky vstupních dat. Pro provedení automatických výpočtů není nutné, aby u všech použitých zařízení byly měřeny všechny veličiny. Malé žlaby jsou znázorněny světlejší barvou, jelikož hmotnostní úbytky jsou měřeny pro všechny žlaby dohromady, a tudíž se k nim přistupuje jako k jednomu prvku. Teploty a změny délek se měří na každém zvlášť, a tudíž je potřeba s nimi udělat patřičné výpočty pro převedení jejich hodnot na jeden prvek.

Tab. 6 Výpis měřených veličin jednotlivých žlabů

Žlab	Okolní teplota	Hmotnostní úbytek	Změny délky	Teplota uvnitř	Teplota na plášti
Velký žlab 1					
Velký žlab 2					
Velký žlab 3					
Malý žlab 1					
Malý žlab 2					
Malý žlab 3					

4.4.1 Základní naměřená data

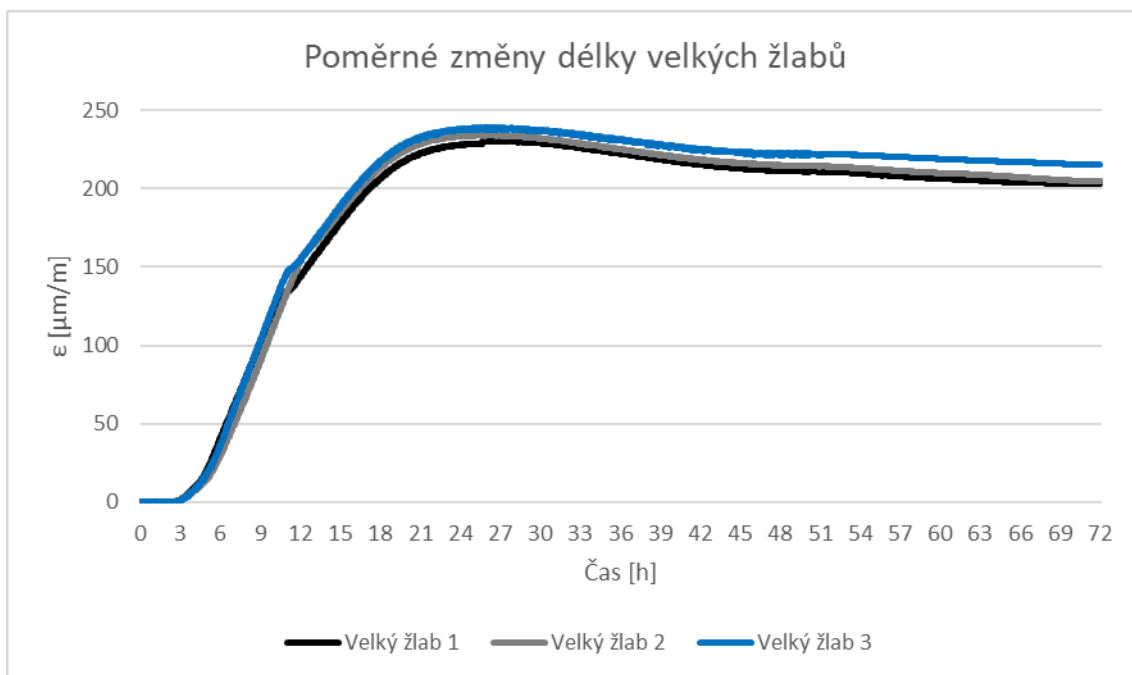
Na začátku vyhodnocování je nutné znát základní naměřená data, což jsou délky základů a hmotností betonů. Tyto údaje jsou vidět v Tab. 7. Je logické, že délky základů jsou pro jeden druh žlabu (velký/malý) stejné. Bohužel se však malé žlaby nevážíly zvlášť a tím pádem je jejich hmotnost počítána dohromady.

Tab. 7 Základní data o žlabech a betonech

Hodnota	Velký žlab 1	Velký žlab 2	Velký žlab 3	Malý žlab 1	Malý žlab 2	Malý žlab 3
Hmotnost čerstvého betonu	12438 g	12578 g	12990 g	5623 g		
Měřená základna	1025 mm			300 mm		

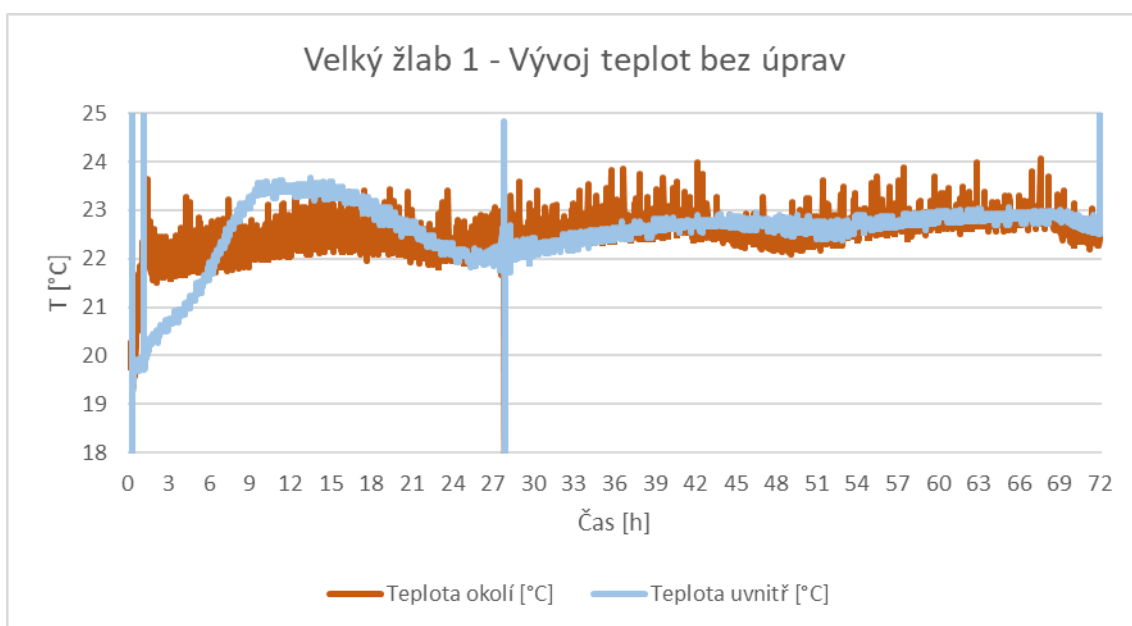
Když se podíváme na hodnoty velkých žlabů, jsou sice velmi podobné, ale nejsou totožné. U malých žlabů přepočítání na jeden žlab může zapříčinit určitý stupeň chyby ve vyhodnocování. To je taky důvod, proč se s nimi počítá jako s jedním prvkem.

Očištěná data od „nesmyslných“ hodnot jsou zobrazena na Obr. 53, kde je znázorněn průběh poměrných přetvoření všech tří velkých žlabů. Z grafu je patrná nízká variabilita měření na jednotlivých žlabech. Z tohoto důvodu bude další postup vyhodnocení a výsledky ilustrovány pouze na jednom žlabu.



Obr. 53 Naměřená poměrná přetvoření všech tří velkých žlabů

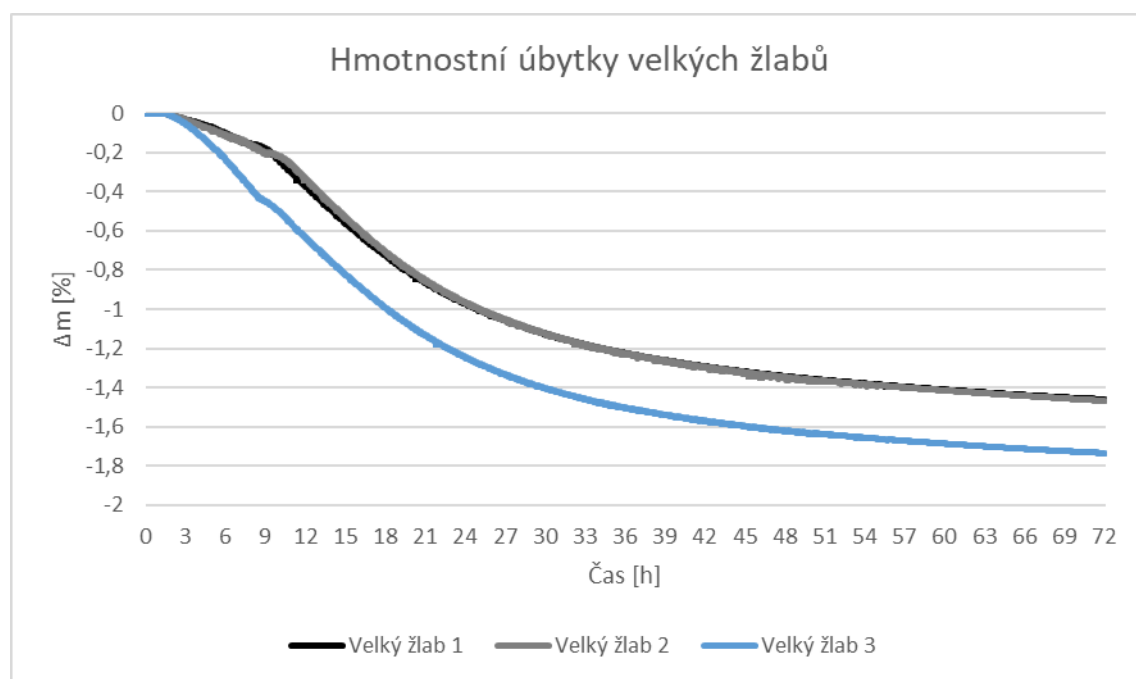
Pro ukázkou základních naměřených dat byly použity výstupy z měření pro velký žlab 1, bez jakýchkoliv dalších úprav. Na Obr. 54 je vidět vývoj teplot pro beton uložený v tomto žlabu. Lze si všimnout, že na začátku a na konci jsou velké skoky v teplotách. To jsou hodnoty, kdy se zapojovala či přepojovala měřící čidla a manipulovalo se se žlaby. Dále je vidět zhruba ve 28 hodinách velký skok v záznamu teplot. Tento skok byl způsoben vstupem pracovníka do laboratoře, za účelem vyzvednutí trojice zkušebních těles určených k dalšímu měření smrštění dle normy ČSN 12617-4 [24].



Obr. 54 Velký žlab 1 – vývoj teplot bez úprav

Z těchto výkyvů je také patrné, že jakýkoliv pohyb osob je okamžitě vidět na záznamu měření, a proto jakékoliv zásahy, chyby či anomálie v místnosti nebo na měřicím zařízení lze poznat poměrně snadno.

Je potřebné hned říci na začátku, že zhruba do prvních 24 hodin dochází k nabývání, a to i přesto, že povrch zkušebních těles nebyl chráněn proti vysychání a byl prokazatelně zaznamenán úbytek hmotnosti zkušebních těles (což ukazuje Obr. 55). Až po této uplynulé době lze vidět pokles křivky poměrného přetvoření a tehdy se teprve jedná o smršťování. Tento jev souvisí zřejmě s vysokým vodním součinitelem betonu. Zkušební tělesa uložená ve žlabech vysychají pouze jedním povrchem. Vlivem vysokého vodního součinitele se voda z čerstvého betonu částečně odlučuje (tzv. krvácení betonu) a tím v podstatě „ošetrjuje“ horní povrch betonu. Zbývající voda se vrací zpět do pórové struktury betonu a způsobuje nabývání. Toto nabývání je pak částečně podpořeno teplotní roztažností betonu, což bude podrobněji objasněno v následujících odstavcích.



Obr. 55 Hmotnostní úbytky všech tří velkých žlabů

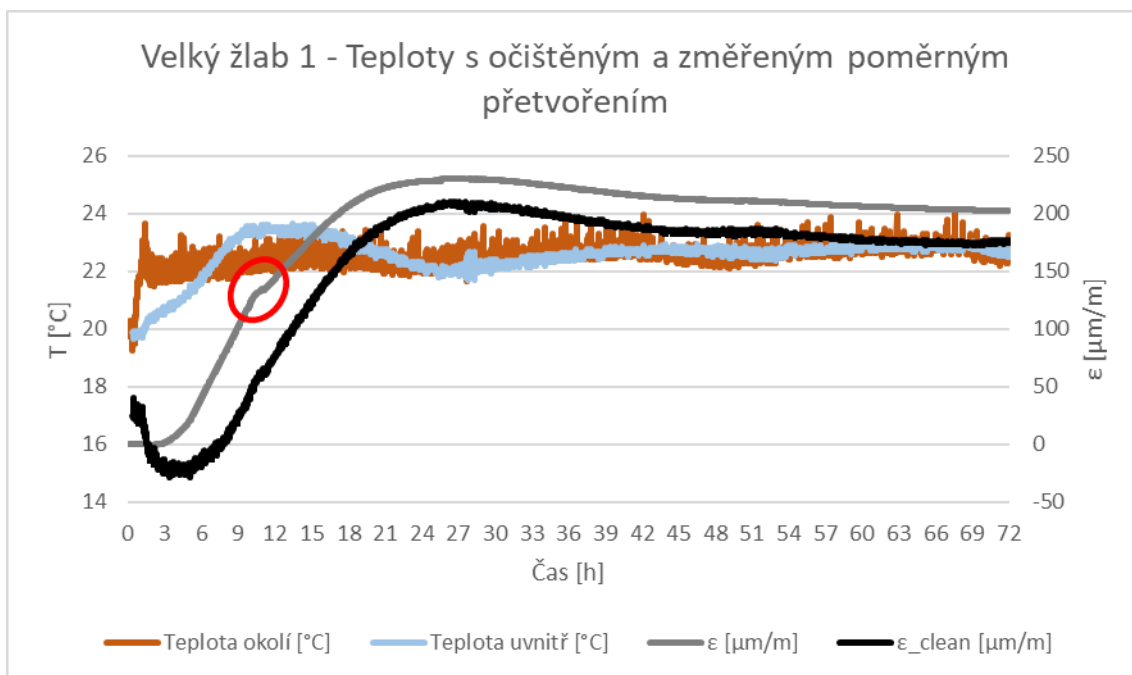
4.4.2 Vyhodnocení dat

Pro vyhodnocení dat byl použit program, popsáný v kapitole 4.3.1 včetně základních výpočtů, které program provádí. Byla provedena teplotní korekce dle vzorce (16). Ta se odečetla od poměrného přetvoření těles (ε [$\mu\text{m}/\text{m}$]) a výsledné poměrné přetvoření od smrštění nese název $\varepsilon_{\text{clean}}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]. Samotné poměrné přetvoření od teploty je vypočítáno dle součinitele teplotní roztažnosti betonu, který je získán aproximací docenta Frantíka dle vzorce (13) ilustrovaném na Obr. 50. Následným odečtením těchto křivek poměrných přetvoření bylo získáno poměrné přetvoření od teploty s označením ε_T [$\mu\text{m}/\text{m}$]. Jeho průběh je vidět na Obr. 58. Podrobný výpočet je uveden v kapitole 4.3.1.1.

Pro každý velký žlab byly vytvořeny následující grafy a závislosti:

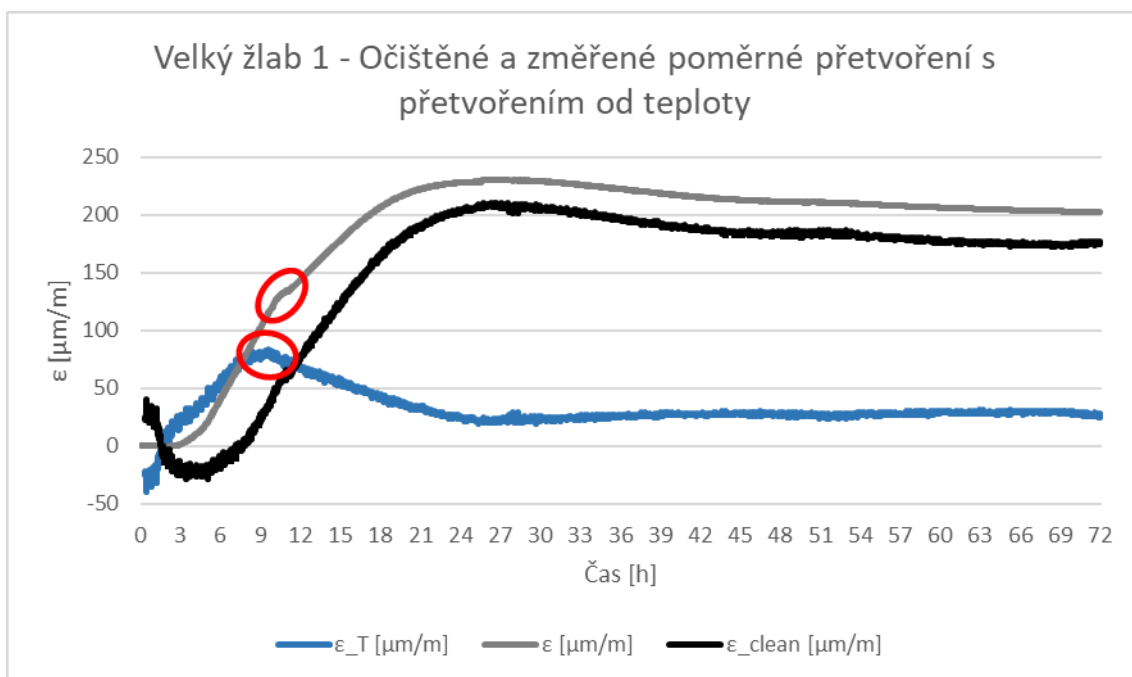
- Průběh teploty v souvislosti s celkovým poměrným přetvořením betonu a poměrným přetvořením betonu očištěným od vlivu teplotní roztažnosti
- Celková a očištěná poměrná přetvoření v souvislosti s poměrným přetvořením vlivem změny teploty
- Průběh teploty v souvislosti s hmotnostním úbytkem zkušebních těles
- Celková a očištěná poměrná přetvoření v souvislosti s hmotnostním úbytkem betonu

Z grafu na Obr. 56 (zakroužkováno) je vidět, jak „menší zub“ v křivce poměrného přetvoření koresponduje s vrcholem teplotní křivky zaznamenané uvnitř zkušebního tělesa. Tento bod se nachází v cca 10 hodině záznamu měření. Tento vrchol teploty se už dále ve žlabu neobjevuje. Je také vidět, jak vnitřní teplota zkušebního tělesa následuje okolní teplotu, avšak s menším zpožděním. Stojí za připomenutí, že na křivce celkového poměrného přetvoření bylo zaznamenáno nabývání po dobu 24 hodin, poté nastalo smršťování. Toto nabývání je způsobeno několika faktory, mezi něž se řadí také teplotní roztažnost materiálu. Na Obr. 56 a Obr. 58 jsou znázorněny křivky celkových poměrných přetvoření (ε) v kontrastu s křivkami po odečtení teplotních deformací (ε_T). Z těchto průběhů je zřejmé, že nárůst teploty hraje významnou roli zejména v prvních hodinách zrání kompozitu. Po odečtení teplotní deformace dojde k vyhlazení onoho zmiňovaného „zubu“ v 10 hodinách měření. Na obrázku je také vidět, že i po odečtení teplotních vlivů, kompozit stále nabývá. Tato část nabývání je pravděpodobně způsobena vysokým vodním součinitelem, případně expanzivními složkami cementu. Tato tvrzení je nutno doložit dalšími výpočty a měřeními.

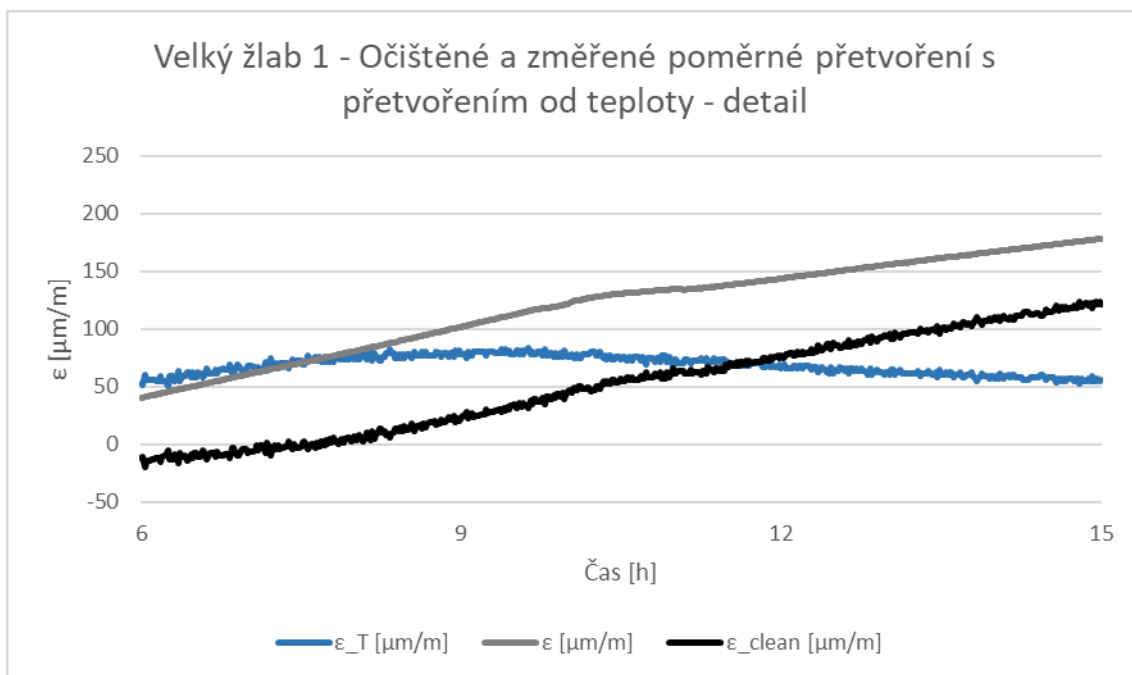


Obr. 56 Velký žlab 1 – Teploty s očištěným a změřeným poměrným přetvořením

Pro porovnání je na Obr. 57 zobrazen graf celkových poměrných přetvoření a poměrných přetvoření od změny teploty. To je znázorněno tmavě modrou barvou (ϵ_T). Pokud od celkového poměrného změřeného přetvoření (ϵ) odečteme tuto křivku (ϵ_T), dostaneme poměrné přetvoření (ϵ_{clean}) očištěné od vlivu teplotních změn. Vrchol křivky poměrného přetvoření od teploty je v tom zmiňovaném „zubu“ (detail na Obr. 58) změřeného celkového poměrného přetvoření v přibližně 10 hodinách.

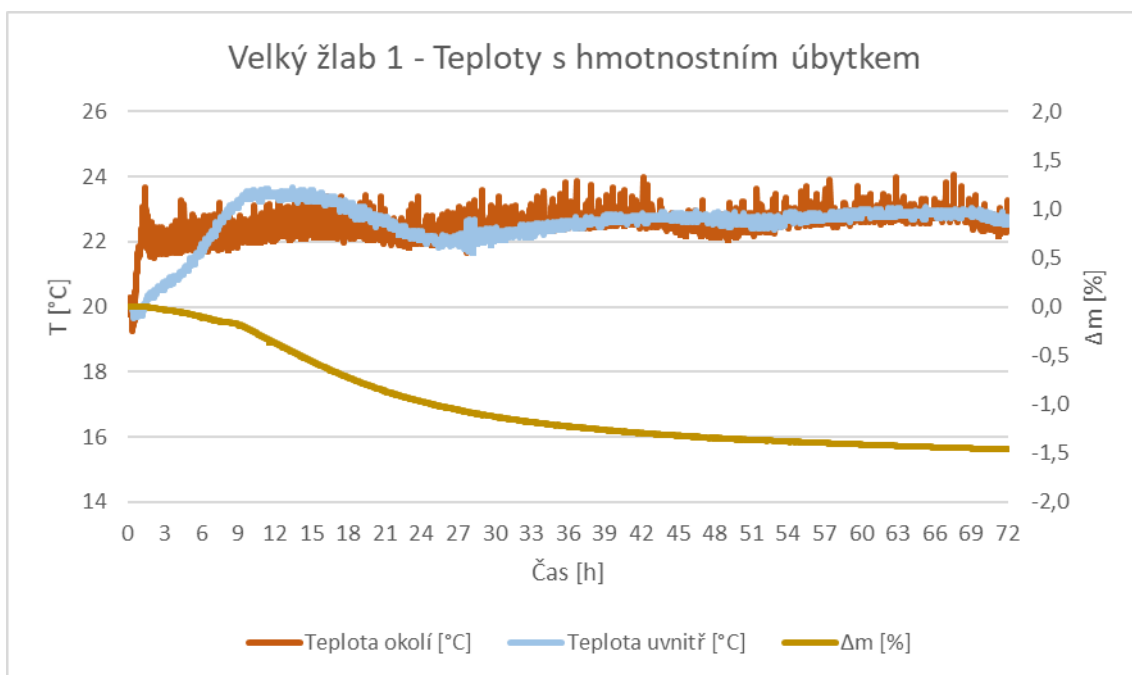


Obr. 57 Očištěné a změřené poměrné přetvoření s přetvořením od teploty



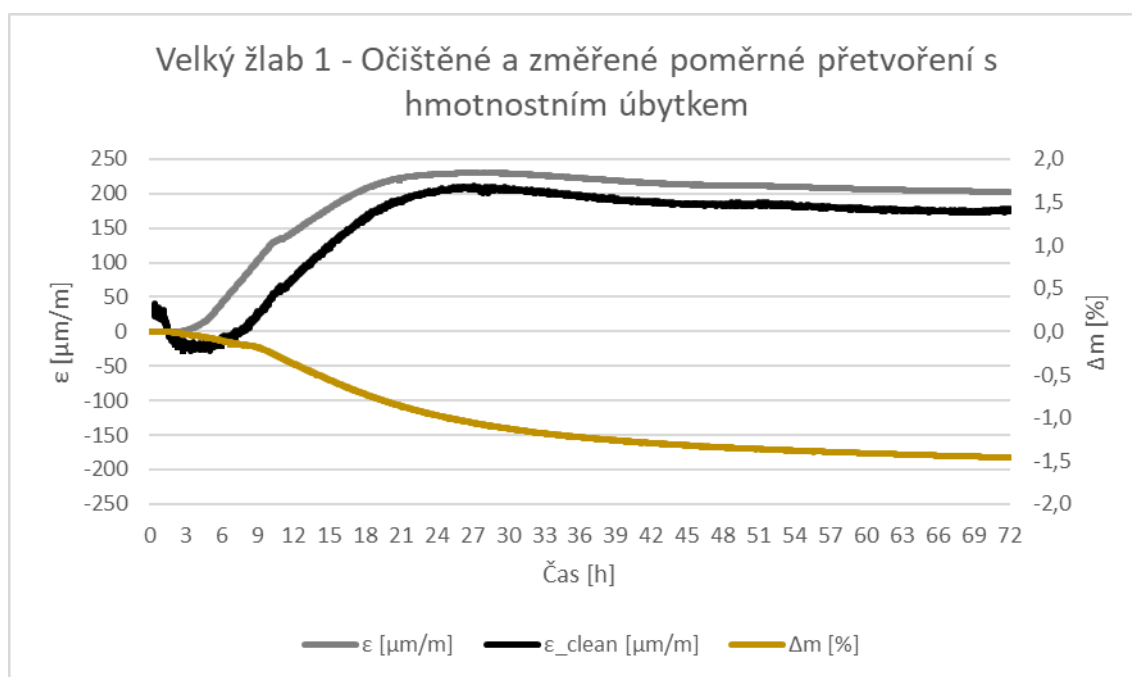
Obr. 58 Velký žlab 1 Detail „zubu“ – Očištěné a změřené poměrné přetvoření s přetvořením od teploty

V grafu s teplotami a hmotnostním úbytkem je vidět opět závislost mezi maximální teplotou ve zkušební tělese a nárůstem hmotnostních úbytků (Obr. 59). Tento okamžik je vidět opět ve výše zmiňovaných 10 hodinách, kde byla zaznamenána nejvyšší teplota uvnitř zkušební tělesa a hmotnostní úbytky začaly rychleji narůstat.



Obr. 59 Velký žlab 1 – Teploty s hmotnostním úbytkem

Jako poslední závislost velkého žlabu 1 je graf na Obr. 60. Zde je opět viditelná souvislost mezi hmotnostními úbytky a průběhem poměrných přetvoření. V počáteční fázi zrání byl zaznamenán mírný pokles hmotnosti. To se však na křivce celkových deformací nijak neprojevalo. Pokud se ale podíváme na křivku deformací očištěnou od vlivu teplotních změn je vidět, že v této fázi kompozit mírně smršťuje (zhruba do 4 hodiny). I přesto, že v okamžiku dosažení maximální teploty uvnitř zkušebního tělesa (cca 10 hodin od začátku měření, „zub“ na křivce celkových přetvoření) byl zaznamenán prudší nárůst hmotnostních úbytků, nebylo zaznamenáno masivní smršťování. Naopak, zkušební těleso stále nabývalo na délce. Tento jev, jak již bylo zmíněno dříve, zřejmě souvisí s množstvím a redistribucí vody v pórové struktuře materiálu.



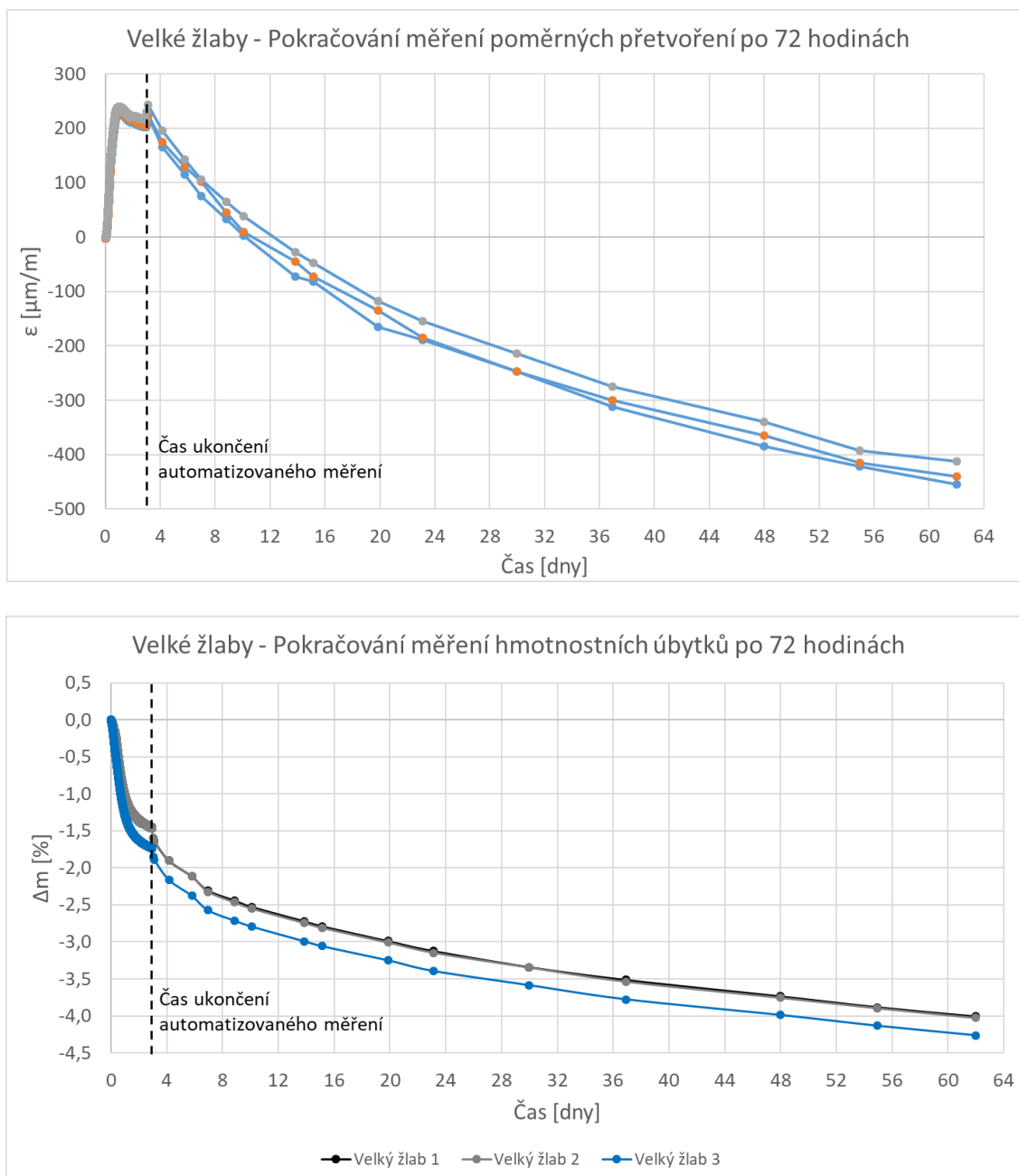
Obr. 60 Velký žlab 1 – Očištěné a změřené poměrné přetvoření s hmotnostním úbytkem

Grafy velkých žlabů 2 a 3 spolu s grafy malých žlabů jsou k nalezení v přílohách na konci této práce.

4.4.3 Další postup řešení

Pro další výzkum a obohacení dat se dá dělat mnohé. Na samotné smrštění má vliv velikost tělesa. Na tento jev by se daly udělat další experimenty na zkušebních tělesech různých délek a příčných průřezů. Proto také byly v rámci pilotního měření vyrobeny tři sady zkušebních těles různých rozměrů. Na základě vyhodnocení těchto měření bude navržen další postup.

Nezbytnou součástí prezentovaných měření jsou dlouhodobá měření smrštění a hmotnostních úbytků vlivem vysychání. Tento postup je popsán v kapitole 4.1.4. Pro ukázkou je zde znázorněn průběh dlouhodobých deformací všech tří velkých žlabů na Obr. 61. Měření stále probíhá.



Obr. 61 Ukázka dlouhodobých měření poměrného přetvoření (nahore) a hmotnostních úbytků (dole) všech tří velkých žlabů

V rámci pilotního experimentu v laboratoři se prováděla další doprovodná měření, jako je např. měření ve smršťovacím kuželu, z něhož by se měla vyčíslit velikost chemického a případného autogenní smrštění. O tato data se dají rozšířit stávající výsledky.

Dále lze data rozšířit o údaj určující dobu tuhnutí. Pro tento účel byl v rámci pilotních experimentů použit ultrazvukový přístroj Vikasonic.

4.5 POROVNÁNÍ EXPERIMENTU S MODELEM B4

Naměřená data se porovnávala s výpočtovým modelem B4. Je to kontrolní výpočet, který může mít přínos jak pro zhodnocení celého experimentu, tak porovnání zmíněného modelu B4 s existujícími daty smršťování.

Celý výpočet je proveden dle vzorového výpočtu profesora Bažanta v [13]. Tudíž veškeré rovnice, vysvětlivky a detaily lze najít v jeho článku. Popřípadě další rozšíření výpočtu, kdy se do betonu přimíchá příměs.

Celou publikaci [13] lze stáhnout na stránkách publikací profesora Bažanta <http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/>, pod číslem 549.

4.5.1 Vstupní data

Pro výpočet byla použita vstupní data vypsána v Tab. 8. Jejich krátký popis je v kapitole 4.5.1.1 níže. Výpočet byl proveden pro *Velký žlab 1*.

Tab. 8 Vstupní data pro výpočet dle modelu B4

<i>typ</i>	<i>t'</i>	<i>t₀</i>	<i>h</i>	<i>f_c</i>	<i>V/S</i>	<i>c</i>	<i>w/c</i>	<i>a/c</i>	<i>σ</i>
<i>cementu</i>	<i>(dny)</i>	<i>(dny)</i>	<i>(%)</i>	<i>(MPa)</i>	<i>(mm)</i>	<i>(kg/m³)</i>			<i>(MPa)</i>
RS	0,0625	0,0625	55	17	100	489	0,5	3	0

4.5.1.1 Popis vstupních dat

Typ cementu je v tomto případě *RS*, což je rychle tvrdnoucí cement. Další možnost je *R*, což značí běžný cement a *SL*, což je pomalu tvrdnoucí cement.

Stáří betonu při zatížení *t'* je v odhadnuto na 1,5 hodiny po smíchání cementu s vodou. Zde nějakou dobu trvalo, než se čerstvý beton nalil do žlabů, z důvodu vážení, zkoušek konzistence a osazování žlabů na váhový stůl.

Stáří betonu při vystavení okolním podmínkám *t₀* je stejné jako stáří betonu při zatížení. Odhadnuto na 1,5 hodiny.

Vlhkost vzduchu *h* byla udržována v laboratoři mezi 55-60 %.

Válcová pevnost betonu *f_c*. Zde byla použita hranolová pevnost. Pro výpočet byla použita i snížená hodnota pevnosti, avšak kontrolním výpočtem bylo ověřeno, že tato

úvaha neovlivňuje výsledek, a tudíž byla pro účely výpočtu použita hodnota experimentálně zjištěné hranolové pevnosti.

Podíl objemu zkušebního tělesa ku povrchu vystavenému vysychání V/S je dáno výpočtem. Kde žlaby mají rozměry 100x60x1025 mm. Otevřený povrch byl horní povrch betonu o rozměrech 100x1025 mm.

Množství cementu na metr krychlový betonu c byl 489 kg/m³. Hodnota byla stanovena dle výpočtu v rovnici (x).

$$c = \frac{c_{vzorek}}{V_{vzorek}} \quad (17)$$

Kde:

- c_{vzorek} – skutečná hmotnost cementu použita pro výrobu vzorků (kg)
- V_{vzorek} – teoretický objem namíchaného čerstvého betonu (m³)
- c – odhad množství cementu na metr krychlový betonu (kg/m³)

Pro výpočet byly použity tyto hodnoty: $c_{vzorek} = 12,150 \text{ kg}$ a $V_{vzorek} = 0,02485 \text{ m}^3$.

Podíl vody ku cementu w/c byl 0,50. Kompletní popis čerstvého betonu lze najít v kapitole 4.1.1.

Podíl plniva ku cementu a/c byl 3.

Aplikované tlakové napětí σ nebylo žádné.

4.5.2 Výpočet

Pro výpočet bylo stanoveno dvacet hodnot v průběhu 72 hodin, takže hodnota každých 3,6 hodin. Tudíž všechny mezi výpočty, vztažené k časovému údaji, byly prováděny dvacetkrát, aby byly známy hodnoty smrštění ve vymezeném časových intervalech.

Pro výpočet je nutné znát typ cementu, což byl RS – rychle tvrdnoucí cement. Toto je potřeba pro všechny mezi výpočty, neboť se různé součinitele berou ze tří různých tabulek, dle typu cementu.

Zde jsou vypsány všechny součinitele dle tabulek 1, 2 a 3 v [13] pouze pro typ cementu RS.

Tab. 9 Tabulky součinitelů nutných pro výpočet pro cement typu RS

Tabulka 1							
τ_{cem}	$p_{\tau a}$	$p_{\tau w}$	$p_{\tau c}$	ϵ_{cem}	$p_{\epsilon a}$	$p_{\epsilon w}$	$p_{\epsilon c}$
0,08	-0,33	-2,4	-2,7	0,00086	-0,8	-0,27	0,11

Tabulka 2						
$\tau_{au,cem}$	$r_{\tau w}$	r_t	r_α	$\epsilon_{au,cem}$	$r_{\epsilon a}$	$r_{\epsilon w}$
41	3	-4,5	1,4	-8,4E-05	-0,75	-3,5

Tabulka 3						
p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_{5H}	p_{2w}
0,6	0,0174	0,0393	0,0034	9,46E-05	1	3
p_{3a}	p_{3w}	p_{4a}	p_{4w}	$p_{5\epsilon}$	p_{5a}	p_{5w}
-1,1	0,4	-0,9	2,45	-0,85	-1	0,78

Zdroj: Hodnoty získány pro cement typu RS z [13]

Další součinitelé jsou pro typ plniva, který je v tomto případě normový křemičitý písek. K tomu má nejbližší označení „Quartzite“ v [13] v tabulce 6. Součinitelé jsou zde uvedeny v Tab. 10.

Tab. 10 Tabulka součinitelů pro typ plniva „Quartzite“

Tabulka 6	
$k_{\tau a}$	$k_{\epsilon a}$
0,59	0,71

Zdroj: Součinitelé získány z tabulky 6 pro typ plniva „Quartzite“ v [13]

Výsledky součinitelů a hodnot dle B4 jsou v Tab. 11. Postup je stejný, jako v publikaci [13], takže pro kontrolu či zopakování stačí postupovat stejně.

Tab. 11 Výpočet modelu B4. Všechna čísla rovnic odkazují na rovnice v publikaci [13]

E_{28} (MPa)	τ_0 (dny)	τ_{sh} (dny)	ϵ_0	$E(\tau_0+\tau_{sh})$ (GPa)	$E(607d)$ (GPa)	$\epsilon_{sh\infty}$	S_t
19535,27 (29)	0,023029 (22)	543,47 (21)	1,44E-03 (16)	21010 (19)	21020 (19)	-1,02E-03 (17)	viz tab. (15)
k_h	ϵ_{sh}	$\epsilon_{au\infty}$	τ_{au} (dny)	ϵ_{au}	q_1 (MPa ⁻¹)	q_2 (MPa ⁻¹)	q_3 (MPa ⁻¹)
0,833625 (20)	viz tab. (14)	5,41E-05 (25)	93,40 (26)	viz tab. (24)	3,07E-05 (28)	3,96E-05 (40)	3,73E-06 (41)
q_4 (MPa ⁻¹)	$r(t')$	$Z(t,t')$	$Q_f(t')$	$Q(t,t')$	C_0 (MPa ⁻¹)	q_5 (MPa ⁻¹)	S_{tc}
1,24E-05 (42)	9,22 (35)	viz tab. (34)	2,50 (33)	viz tab. (32)	viz tab. (31)	9,54E-05 (43)	viz tab. (15)
					C_d (MPa ⁻¹)	J (MPa ⁻¹)	$\epsilon(t)$
					viz tab. (37)	1,00 (38)	viz tab. (36)
							viz tab. (27)
							viz tab. (12)(13)

Zdroj: Rovnice a příklad výpočtu k nalezení v [13]

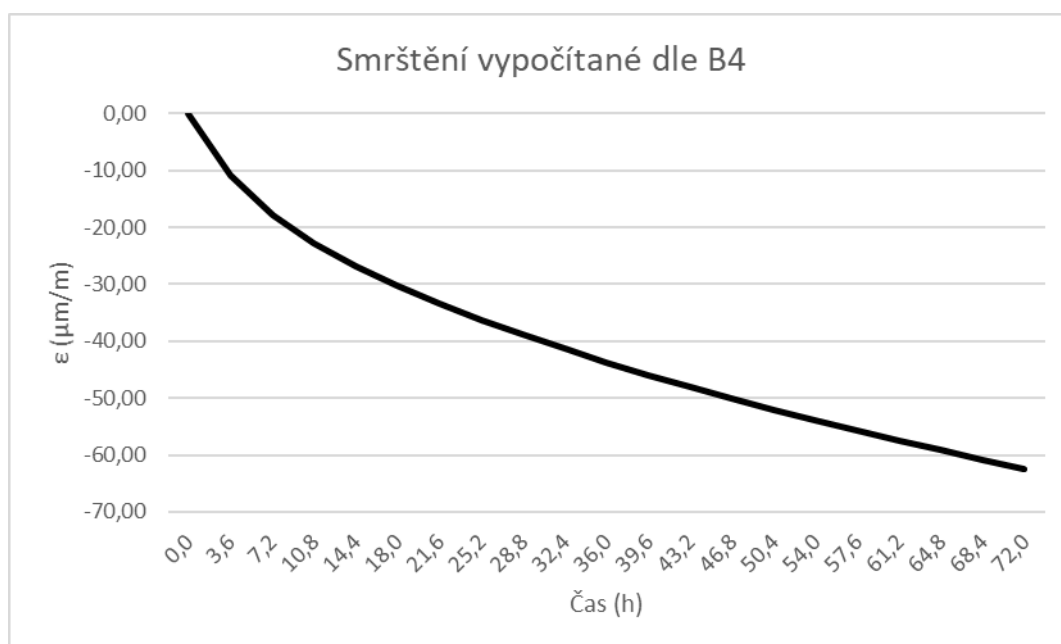
Odkaz *viz. tab.* odkazuje na Tab. 12, kde jsou výpočty pro získání hodnot součinitelů, do kterých vstupoval čas. Výpočet byl proveden pro rozsah experimentu v laboratoři při automatizovaném měření. Ten trval 72 hodin a tím pádem pro vytvoření časové závislosti bylo potřeba vypočítat více hodnot. Bylo zvoleno 20 hodnot po 3,6 hodinách, které pokryjí rozsah 72 hodin.

Tab. 12 Výpočet součinitelů a hodnot vyžadujících čas, pro výpočet 20 hodnot během 72 hodin

t (h)	t (dny)	E(t) (MPa)	S _t	ε _{sh} (m/m)	ε _{au} (m/m)	Z(t,t')	Q(t,t')	C ₀ (Mpa ⁻¹)	S _{ic}	H(t,t ₀)	C _d (Mpa ⁻¹)	J (Mpa ⁻¹)	ε _{sh,total} (μm/m)	ε (μm/m)
0,0	0,00	0,0	0,0000	0	-4,9E-30	-0,2582	0	0	0	1	0	0,00003	0,00	0,00
3,6	0,15	3723,6	0,0127	-1,1E-05	-1,3E-25	0,3355	0,3355	0,00003	0,0127	0,9943	4,4E-06	0,00006	-10,80	-10,80
7,2	0,30	5185,9	0,0209	-1,8E-05	-1,1E-23	0,8524	0,8524	0,00006	0,0209	0,9906	5,6E-06	0,00009	-17,79	-17,79
10,8	0,45	6257,6	0,0267	-2,3E-05	-1,9E-22	1,3100	1,3097	0,00008	0,0267	0,9880	6,4E-06	0,00012	-22,72	-22,72
14,4	0,60	7122,0	0,0314	-2,7E-05	-1,6E-21	1,7206	1,7149	0,00010	0,0314	0,9859	6,9E-06	0,00014	-26,76	-26,76
18,0	0,75	7851,6	0,0356	-3,0E-05	-8,5E-21	2,0930	2,0536	0,00011	0,0356	0,9840	7,3E-06	0,00015	-30,26	-30,26
21,6	0,90	8484,3	0,0392	-3,3E-05	-3,5E-20	2,4336	2,2877	0,00013	0,0392	0,9823	7,7E-06	0,00016	-33,39	-33,39
25,2	1,05	9043,1	0,0426	-3,6E-05	-1,1E-19	2,7475	2,4098	0,00013	0,0426	0,9808	8,0E-06	0,00017	-36,26	-36,26
28,8	1,20	9543,1	0,0457	-3,9E-05	-3,3E-19	3,0385	2,4624	0,00014	0,0457	0,9794	8,3E-06	0,00018	-38,91	-38,91
32,4	1,35	9995,0	0,0486	-4,1E-05	-8,3E-19	3,3098	2,4843	0,00014	0,0486	0,9781	8,6E-06	0,00018	-41,39	-41,39
36,0	1,50	10406,7	0,0514	-4,4E-05	-1,9E-18	3,5639	2,4940	0,00014	0,0514	0,9769	8,8E-06	0,00018	-43,73	-43,73
39,6	1,65	10784,3	0,0540	-4,6E-05	-4,1E-18	3,8028	2,4986	0,00014	0,0540	0,9757	9,1E-06	0,00018	-45,96	-45,96
43,2	1,80	11132,4	0,0565	-4,8E-05	-8,2E-18	4,0282	2,5009	0,00014	0,0565	0,9746	9,3E-06	0,00018	-48,07	-48,07
46,8	1,95	11454,9	0,0589	-5,0E-05	-1,6E-17	4,2416	2,5022	0,00014	0,0589	0,9735	9,5E-06	0,00018	-50,10	-50,10
50,4	2,10	11754,8	0,0612	-5,2E-05	-2,8E-17	4,4441	2,5029	0,00015	0,0612	0,9725	9,7E-06	0,00019	-52,05	-52,05
54,0	2,25	12034,7	0,0634	-5,4E-05	-4,9E-17	4,6369	2,5033	0,00015	0,0634	0,9715	9,8E-06	0,00019	-53,93	-53,93
57,6	2,40	12296,8	0,0655	-5,6E-05	-8,3E-17	4,8209	2,5036	0,00015	0,0655	0,9705	1,0E-05	0,00019	-55,74	-55,74
61,2	2,55	12542,8	0,0676	-5,7E-05	-1,4E-16	4,9967	2,5038	0,00015	0,0676	0,9696	1,0E-05	0,00019	-57,49	-57,49
64,8	2,70	12774,4	0,0696	-5,9E-05	-2,1E-16	5,1652	2,5039	0,00015	0,0696	0,9687	1,0E-05	0,00019	-59,20	-59,20
68,4	2,85	12992,8	0,0715	-6,1E-05	-3,3E-16	5,3268	2,5040	0,00015	0,0715	0,9678	1,0E-05	0,00019	-60,85	-60,85
72,0	3,00	13199,3	0,0734	-6,2E-05	-5,0E-16	5,4822	2,5041	0,00015	0,0734	0,9670	1,1E-05	0,00019	-62,46	-62,46

Zdroj: Výpočty s označením rovnic jsou v Tab. 11

Výsledná závislost smrštění na čase je zobrazena na Obr. 62. Z důvodu krátkého časového úseku, první hodnota není definována, jelikož se jedná o záporné hodnoty pod odmocninou, popř. nedefinovanou hodnotu ve funkci *sinh*. To je dáno časem vystavení okolním podmínkám nebo stáří betonu při zatížení, kdy se tyto hodnoty odčítají od času, kdy chceme vypočítat hodnotu smrštění. Ta pak vyjde záporná v čase 0 hodin a je tím pádem nedefinována.

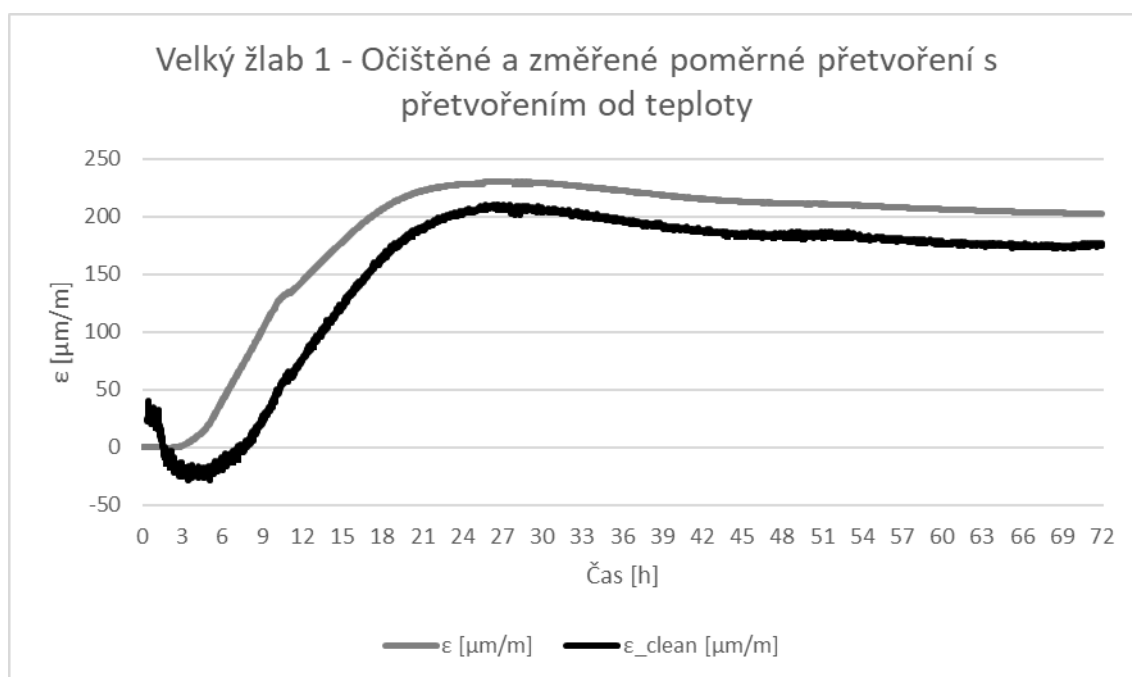


Obr. 62 Vypočítané smrštění během 72 hodin dle modelu B4

4.5.3 Závěr výpočtu B4

Na Obr. 62 lze vidět, že počítaný prvek neustále smršťuje. To je v rozporu v porovnání s výsledky experimentu, kde v prvních 24 hodinách dochází k nabývání. Pro porovnání je zde přiložen graf smršťování velkého žlabu 1 na Obr. 63, pro který byl tento výpočet proveden. Smrštění nastává až po zmiňovaných 24 hodinách. Když však porovnáme konečné smrštění dle výpočtu, které je $62 \mu\text{m/m}$, se smrštěním v experimentu od 27 hodin do 72 hodin, dojdeme v tomto rozmezí na hodnotu smrštění zhruba $35 \mu\text{m/m}$. To je v porovnání s $62 \mu\text{m/m}$ asi 2x méně.

Problém je, že žádný z modelů počáteční nabývání nepředpokládá. Jedním z cílů grantového projektu je také vyřešení problému se zohledněním nabývání ve stávajících predikčních modelech smršťování.



Obr. 63 Velký žlab 1 pro porovnání s B4 – Očištěné a změřené poměrné přetvoření

5 ZÁVĚR

V rámci experimentální a numerické analýzy objemových změn jemnozrnných betonů byly splněny cíle této diplomové práce. Jako první bylo nahlédnuto do problematiky smršťování betonu. Dále byly vyjmenovány různé druhy smršťování a jejich vznik. Jako další návaznost na smršťování byly diskutovány jeho důsledky a jak (pokud je to možné) se jim dá zabránit, popř. alespoň snížit jeho následky.

Byl zmíněn existující predikční matematický model smršťování B4, jeho zkrácený popis, výpis rovnic a využití. Dále ukázky typického vývoje smrštění dle tohoto modelu. Jako doplněk bylo ukázáno, jak se na smršťování dívá norma ČSN EN 1992-1-1.

Následně proběhla rešerše dostupného přístrojového vybavení, kterým se dá zmiňované smršťování měřit. Lze konstatovat, že sortiment je široký ale ne univerzální. Liší se nejen v závislosti na měření určitého typu smrštění, ale dělí se i dle využití v laboratoři, na stavbě, podle možnosti zahájení měření dle stáří betonu nebo jiných sledovaných veličin.

Samotné experimentální měření se provedlo v laboratoři ve spolupráci s odbornými pracovníky a doktorandy z Ústavu stavebního zkušebnictví. S jejich pomocí se vyrobila zkušební tělesa z čerstvého betonu a osadila na váhový stůl. Samotný experiment byl fotograficky zdokumentován, stejně tak bylo pečlivě zaznamenáno složení čerstvého betonu, rozměry žlabů a časy začátků měření. Po 72 hodinách se všechny vzorky odformovaly, zvážily, změřily a přesunuly do další klimatizované laboratoře určené pro dlouhodobá měření smrštění vlivem vysychání. Toto měření bylo taktéž vykonáno a zdokumentováno, i když jeho data nejsou použita v této diplomové práci (tento postup je pouze popsán v kapitole 4.1.5.4). Dlouhodobá měření stále probíhají. Jak již bylo několikrát zmíněno, provedené experimenty probíhaly a stále probíhají v rámci řešení grantového projektu a výsledky z měření se použijí pro účely publikační činnosti či vykazání v dílčí či souhrnné zprávě projektu. Bylo proto záhodno seznámit se s každou částí experimentu, i když v této práci byla zpracována jen dílčí část naměřených dat.

Předposlední část celé diplomové práce je zpracování výsledků. Ta se skládá z několika součástí. Jako první část bylo nutné seznámit se s výstupem měření, s daty a jejich obsahem. Po seznámení se s daty byl autorem této práce vytvořen program pro jejich rychlejší a snazší prvotní zpracování do jednotné formy. Tento program pracuje s daty z ústředny a byla snaha jej naprogramovat co nejvíce univerzálně, aby v případě změn vstupů, přidání nějaké nové naměřené hodnoty k některým ze žlabů, nebylo nutné

program přepisovat. Toto však má svá úskalí, kdy je nutné si nastavit mnoho definic žlabů a jejich sloupců. Proto byl také vytvořen systém uložení nastavení, kdy je tato část značně zjednodušena a zrychlena.

Program se pak použil pro zpracování dat, kde se vytvořily všechny závislosti potřebné pro grafické zobrazení všech veličin, které se u velkých žlabů měřily. Díky programu bylo značně zjednodušeno samotné vyhodnocení teplotní korekce naměřených poměrných přetvoření, kdy se v excelu dopočítala pouze jedna hodnota, a to rozdíl změřeného celkového poměrného přetvoření a přetvoření očištěného od vlivu teplotních změn, aby se mohlo vyčíslit poměrné přetvoření od změn teploty, a to se dalo zakreslit do grafu. Další úprava spočívala ve smazání „nesmyslných“ dat z výsledků měření. Toto se týkalo hlavně začátku a konce měření a okamžiku, kdy do místnosti vstoupila osoba, kde se objevil výkyv teplot ve 28 hodinách (Obr. 54). Samotné smazání těchto dat by se dalo udělat i programově při zpracování dat. Tato funkcionality se snad objeví v dalších verzích programu.

Nakonec se výsledky smršťování z experimentu porovnaly s existujícím modelem B4. Zde se ukázalo, že model B4 nepředpokládá počáteční nabývání betonu. Což je také jeden z důvodů, proč se tyto experimenty provádějí a vyhodnocují v rámci grantového projektu.

6 ZDROJE

- [1] HUBLER, M. WENDNER, H. R., BAŽANT Z. P. Statistical justification of Model B4 for drying and autogenous shrinkage of concrete and comparisons to other models. *Materials and Structures*. 2015, **48**(4), 797-814. DOI: 10.1617/s11527-014-0516-z. ISSN 1359-5997. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-014-0516-z>
- [2] COLLEPARDI, M. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [3] ZVOLÁNEK, L. *Experimentální a numerická analýza relogických procesů v průběhu zrání betonu*. Brno, 2017. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Ivailo Terzijski, CSc.
- [4] AĚTCIN, P.-C. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [5] KRATOCHVÍL, M. *Smršťování vysokopevnostních betonů a možnosti jeho ovlivnění*. Brno, 2011. Pojednání o tématu disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivailo Terzijski, CSc.
- [6] HOLT, E. E. *Early age autogenous shrinkage of concrete*. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2001. ISBN 95-138-5870-7.
- [7] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON, Task Group 8.2. *Constitutive modelling of high strength / high performance concrete: state-of-art report prepared by Task Group 8.2*. NIC. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), c2008. FIB bulletin. ISBN 978-2-88394-082-6.
- [8] DEAN, SW, MOON J.-H., RAJABIPOUR, F., PEASE, B., WEISS, J. Quantifying the Influence of Specimen Geometry on the Results of the Restrained Ring Test. *Journal of ASTM International*. 2006, **3**(8), 100436-. DOI: 10.1520/JAI100436. ISSN 1546962x. Dostupné také z: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?JAI100436>.
- [9] ZONGJIN, LI. *Advanced concrete technology*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2011. ISBN 978-0-470-43743-8.
- [10] NOVÁČEK, J. Studium objemových změn pojivových silikátových směsí. Brno, 2013. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník.
- [11] NGUYEN, D. H., DAO, V. T.N., LURA, P. Tensile properties of concrete at very early ages. *Construction and Building Materials*. 2017, **134**, 563-573. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.169. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181632089X>
- [12] ČSN EN 1992-1-1. Navrhování betonových konstrukcí. -. Praha: ČNI, 2004.
- [13] BAŽANT, Z. P. RILEM draft recommendation: TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete. *Materials and Structures*. 2015, **48**(4), 753-770. DOI: 10.1617/s11527-014-0485-2. ISSN 1359-5997. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-014-0485-2>.
- [14] MÁRTONOVÁ, V., VESELÝ, P., VAŠKOVÁ, J. Experimentální metody pro měření smršťování betonu. *Beton*. Brno: Beton TKS, s. r. o., pro, 2016, **16**(2), 50-57. ISSN 1213-3116.
- [15] MACURA, P., FOJTÍK, F. Experimentální metody v mechanice: 5. přednáška – Tenzometrie. Ostrava, 2013. Přednáška. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

- [16] OTHONOS, A. Fiber Bragg gratings. *Review of scientific instruments*. 1997, **68**(12), 4309-4341.
- [17] *Schleibinger Testing Systems: Shrinkage* [online]. [cit. 2017-08-31]. Dostupné z: <http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Shrinkage>
- [18] VYMAZAL, T., KUCHARCZYKOVÁ, B., MISÁK, P., DANĚK, P. *Způsob kontinuálního měření hmotnostních úbytků cementových kompozitů v raném stádiu tuhnutí a tvrdnutí a zařízení k provádění tohoto způsobu*. Česká republika. Patentový spis, 304898. leden 2015.
- [19] ÖNORM B 3329. Grout – Requirements and test methods. ON, 2009.
- [20] ČSN EN 13872. *Metody zkoušení hydraulicky vytvrzovaných podlahových stěrkových hmot – Stanovení rozměrových změn*. Praha: ČNI, 2004.
- [21] ASTM C1581/C1581M – 09a. *Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage*. ASTM International, West Conshohocken, 2009.
- [22] ASTM C1608-12. *Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste*. ASTM International. West Conshohocken: PA, 2012, www.astm.org.
- [23] ČSN EN 1015-3. *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím strásacího stolku)*. Praha: ČNI, 2000.
- [24] ČSN EN 12617-4. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí. Zkušební metody - Část 4: Stanovení smršťování a rozpínání*. -. Praha: ČNI, 2003.
- [25] KUCHARCZYKOVÁ, B., FRANTÍK, P., ŠIMONOVÁ H., ODSTRČIL, Š., KUBEŠ, P., KERŠNER Z. *Length Changes of Fine-grained Cement-based Composites Specimens in Early Stage of Aging: Correction Reflecting Temperature Variations*. Paris, France, 2017. Článek pro International Conference on Composite Structures. VUT FAST.

7 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Vývoj autogenního smrštění v závislosti na stupni hydratace (převzato z [6]) .	5
Obr. 2	Chemické a autogenní smrštění (C – nehydratovaný cement, W – voda, H – hydratační produkty, K – kapiláry) (Převzato z [3][6][7])	5
Obr. 3	Znázornění autogenního smršťování a smršťování vysycháním/odpařováním (a – beton běžné pevnosti, b – vysokopevnostní beton) (Převzato z [7])	6
Obr. 4	Zobrazení volného a vázaného smrštění (převzato z [3])	8
Obr. 5	Takzvaný „Bermudský trojúhelník“ betonářů (Převzato z [4])	11
Obr. 6	Vývoj pevnosti betonu v tlaku v závislosti na době zrání (převzato z [9]).....	12
Obr. 7	Typické deformační diagramy betonu v tahu (převzato z [11]).....	13
Obr. 8	Vývoj modulu pružnosti v závislosti na stáří betonu (převzato z [11]).....	14
Obr. 9	Typické křivky smršťování dle modelu B4. Ukazující efekt: velikost prvku, teploty, vlhkosti vzduchu, typu cementu (Převzato z [1]).	17
Obr. 10	Postup výpočtu smrštění dle modelu B4 (Převzato z [13]).....	20
Obr. 11	Strunový tenzometr použitý na betonové konstrukci (Převzato z [15]).....	23
Obr. 12	Princip optických vláken s braggovou mřížkou (Převzato z [14]).....	23
Obr. 13	Přenosný deformetr používaný Ústavem stavebního zkušebnictví	24
Obr. 14	Smršťovací žlaby používané Ústavem stavebního zkušebnictví.....	25
Obr. 15	Ohýbací žlab od firmy Schleibinger Testing Systems (Převzato z [17][13]).	26
Obr. 16	Metoda vlnovce (Převzato z [14]).....	26
Obr. 17	Zařízení pro měření ztvrdlých trámů a válců používaný Ústavem stavebního zkušebnictví	27
Obr. 18	Zobrazení prstenců pro měření deformací vyvolaných smrštěním (Převzato z [10]).	28
Obr. 19	Princip Cure reference method (Převzato z [14]).....	28
Obr. 20	Digitální fotogrammetrie (Převzato z [14]).....	29
Obr. 21	Příklad fotogrammetrické mikroskopie (konkrétně snímání posunů při rozlivu čerstvého betonu v tenké vrstvě) (převzato z [10]).....	29
Obr. 22	Smršťovací kužel používaný Ústavem stavebního zkušebnictví	30
Obr. 23	Metoda pro měření tenkovrstvých vzorků od Schleibinger Testing Systems (Převzato z [17]).	31
Obr. 24	Složky betonové směsi připravené na namíchání.....	34
Obr. 25	Prisypávání kameniva za stálého míchání a hotová betonová směs.....	34

Obr. 26	Průběh zkoušky rozlitím betonu	35
Obr. 27	Výsledek zkoušky rozlitím betonu	35
Obr. 28	Zaletování čel smršťovacích žlabů	36
Obr. 29	Velké a malé žlaby připravené na měření	37
Obr. 30	Forma pro výrobu normových zkušebních těles	37
Obr. 31	Vážení žlabů	38
Obr. 32	Hutnění čerstvého betonu na vibračním stole	38
Obr. 33	Kontrola rozteče měřících základů	39
Obr. 34	Detail měřící základny.....	39
Obr. 35	Popis váhového stolu velkých žlabů.....	40
Obr. 36	Osazování velkých žlabů na váhový stůl.....	41
Obr. 37	Vyvažování měřícího ústrojí velkých žlabů pro správné měření hmotnostních úbytků	41
Obr. 38	Hotové malé žlaby a započítání měření.....	42
Obr. 39	Notebook pro zaznamenávání hodnot měření	42
Obr. 40	Velké žlaby po skončení automatizovaného měření v laboratoři.....	43
Obr. 41	Přesun žlabů po skončení měření za plného soustředění.....	43
Obr. 42	Měření malých trámečků s poznačenými trhlinami	44
Obr. 43	Měření změny délky malého trámečku stojanovým deformetrem	44
Obr. 44	Vážení malého trámečku v druhé laboratoři	45
Obr. 45	Deformetr v krabici s kalibrační tyčí.....	45
Obr. 46	Velké prvky uložené v druhé laboratoři za stálé teploty	46
Obr. 47	Ukázka hrubých dat hmotností, délkových změn (vlevo) a teplot z výstupu měření (vpravo).....	49
Obr. 48	Ukázka programu pro zpracování dat: Definování žlabů a jejich vlastností	50
Obr. 49	Ukázka programu pro zpracování dat: Výpis veškerého nastavení před vytvořením excelu.....	51
Obr. 50	Aproximace koeficientu teplotní roztažnosti betonu (Převzato z [25]).....	53
Obr. 51	Princip interpolace hodnot programem	54
Obr. 52	Postup (algoritmus) programu při zpracovávání dat	57
Obr. 53	Naměřená poměrná přetvoření všech tří velkých žlabů	60
Obr. 54	Velký žlab 1 – vývoj teplot bez úprav	60
Obr. 55	Hmotnostní úbytky všech tří velkých žlabů	61
Obr. 56	Velký žlab 1 – Teploty s očištěným a změřeným poměrným přetvořením..	63

Obr. 57	Očištěné a změřené poměrné přetvoření s přetvořením od teploty	63
Obr. 58	Velký žlab 1 Detail „zubu“ – Očištěné a změřené poměrné přetvoření s přetvořením od teploty	64
Obr. 59	Velký žlab 1 – Teploty s hmotnostním úbytkem.....	64
Obr. 60	Velký žlab 1 – Očištěné a změřené poměrné přetvoření s hmotnostním úbytkem	65
Obr. 61	Ukázka dlouhodobých měření poměrného přetvoření (nahore) a hmotnostních úbytků (dole) všech tří velkých žlabů	66
Obr. 62	Vypočítané smrštění během 72 hodin dle modelu B4.....	71
Obr. 63	Velký žlab 1 pro porovnání s B4 – Očištěné a změřené poměrné přetvoření	72

8 SEZNAM TABULEK

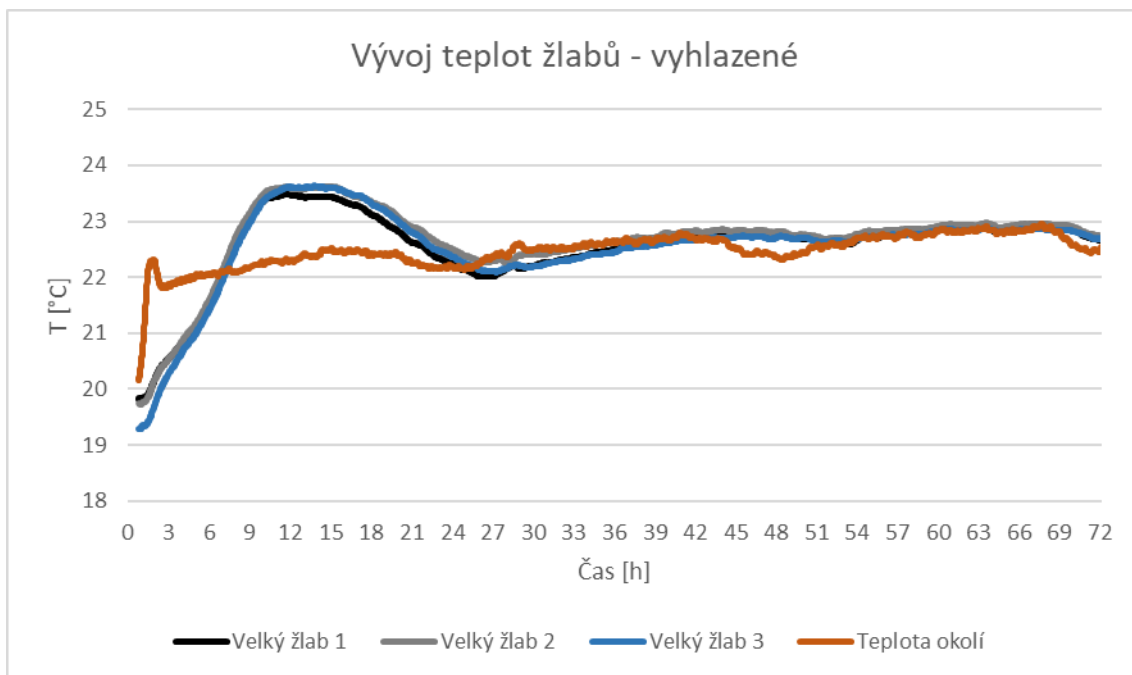
Tab. 1	Hodnoty k_h ve vztahu (5).....	15
Tab. 2	Parametry autogenního smrštění závisících na typu cementu.....	18
Tab. 3	Metody měření smršťování se základními charakteristikami	22
Tab. 4	Složení čerstvého betonu v experimentálním měření	33
Tab. 5	Rozměry žlabů použitých v experimentu.....	36
Tab. 6	Výpis měřených veličin jednotlivých žlabů	59
Tab. 7	Základní data o žlabech a betonech	59
Tab. 8	Vstupní data pro výpočet dle modelu B4.....	67
Tab. 9	Tabulky součinitelů nutných pro výpočet pro cement typu RS	69
Tab. 10	Tabulka součinitelů pro typ plniva „Quartzite“	69
Tab. 11	Výpočet modelu B4. Všechna čísla rovnic odkazují na rovnice v publikaci [13]	70
Tab. 12	Výpočet součinitelů a hodnot vyžadujících čas, pro výpočet 20 hodnot během 72 hodin	71

9 SEZNAM ROVNIC

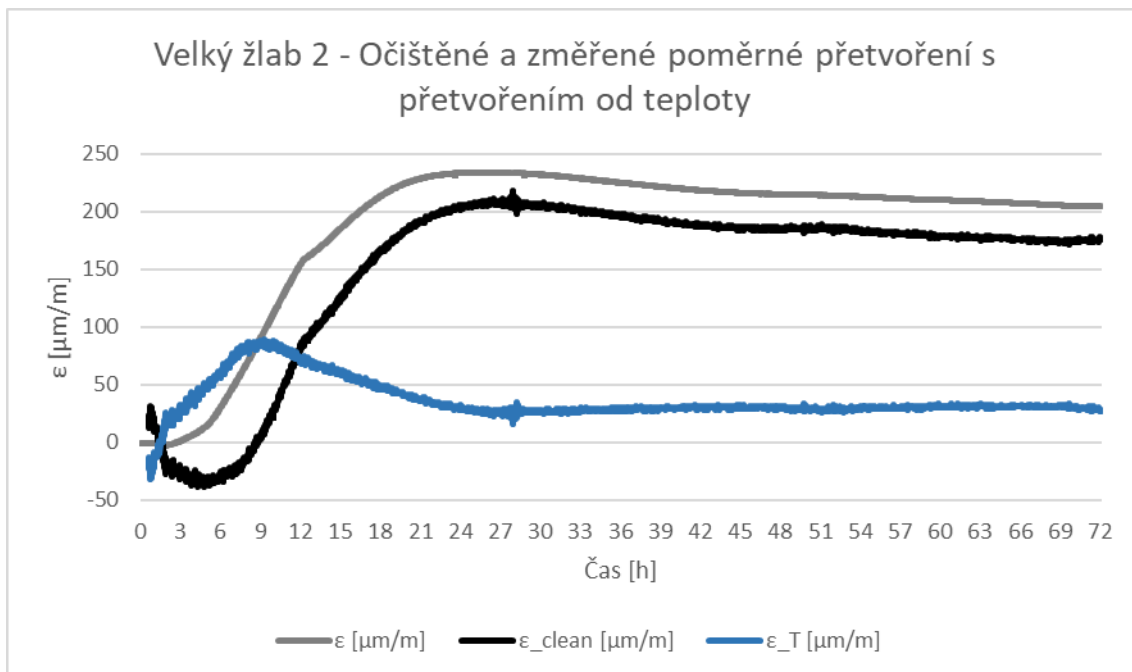
- (1) Rovnice chemické reakce karbonatace (karbonizace)
- (2) Vázané smršťování – výpočet stupně omezení
- (3) Vázané smršťování – výpočet stupně omezení v případě jednoose omezené deformace
- (4) Celkové poměrné přetvoření
- (5) Poměrné smršťování vysycháním
- (6) Součinitel β potřebný pro výpočet poměrného smršťování vysycháním
- (7) Poměrné autogenní smršťování
- (8) Model B4 – Autogenní smrštění
- (9) Model B4 – Smrštění vysycháním
- (10) Model B4 – Celkové smrštění
- (11) Přepočet poměrného přetvoření na délku měřicí základny
- (12) Čisté smrštění bez vlivu teploty a poměrného přetvoření žlabu
- (13) Součinitel teplotní roztažnosti betonu dle aproximace doc. Frantíka
- (14) Poměrné přetvoření betonu od teploty
- (15) Převod hmotnostních úbytků na procentuální vyjádření
- (16) Čisté smrštění bez vlivu teploty
- (17) Přepočet hmotnosti cementu v prvku na 1 m³

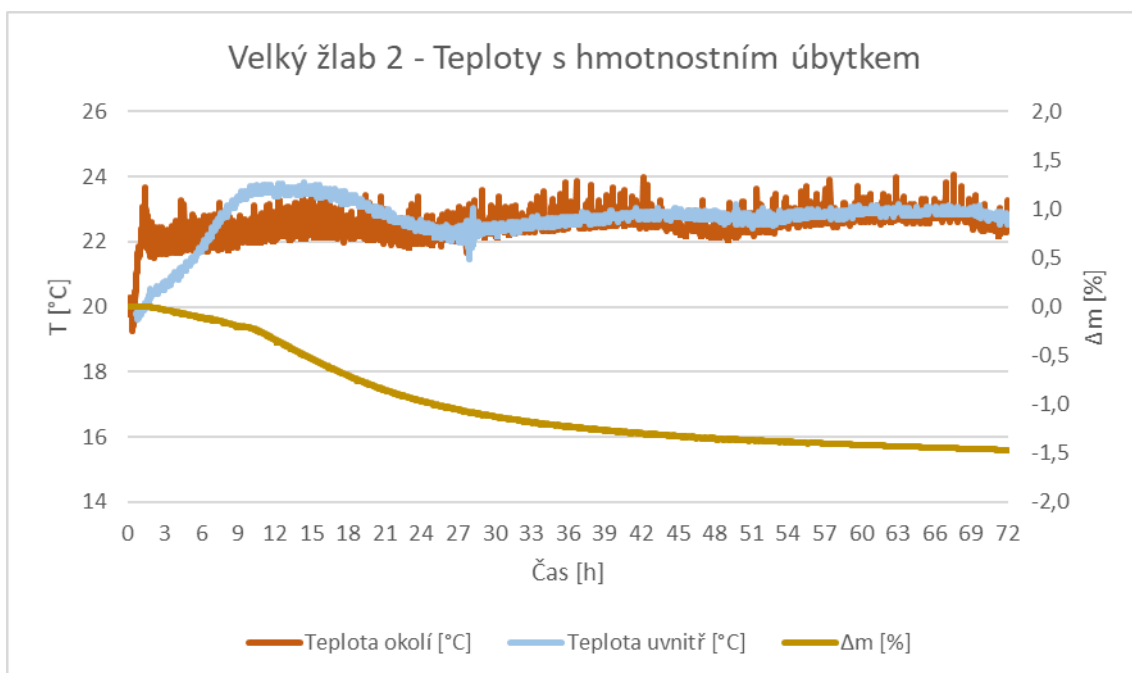
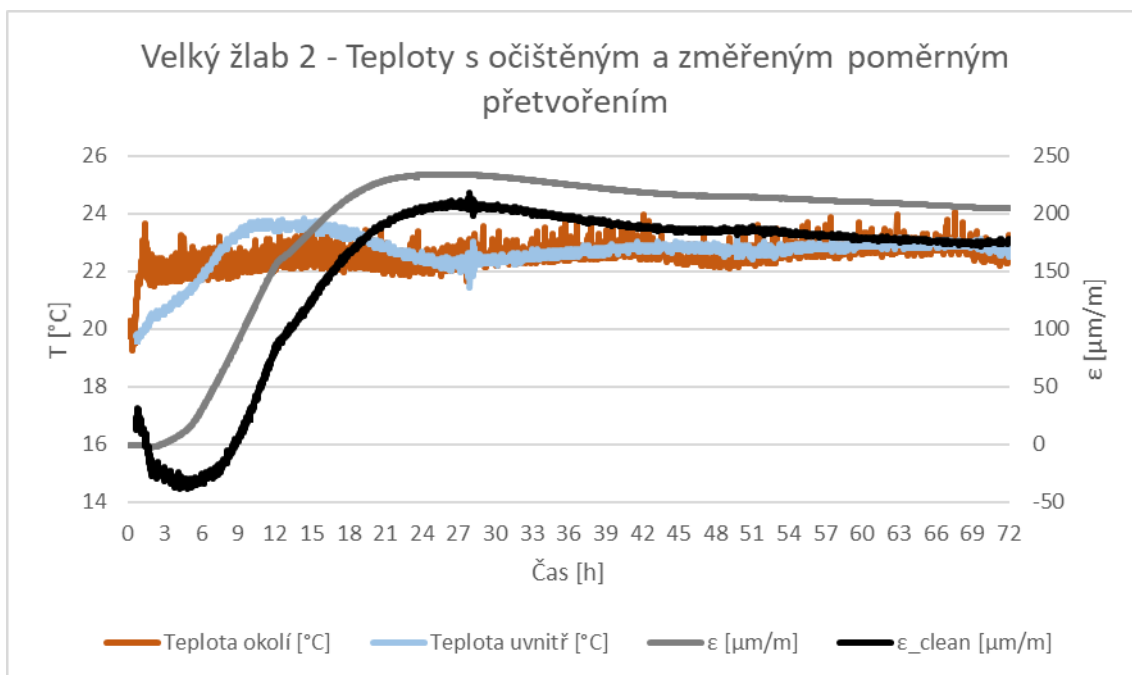
10 PŘÍLOHY

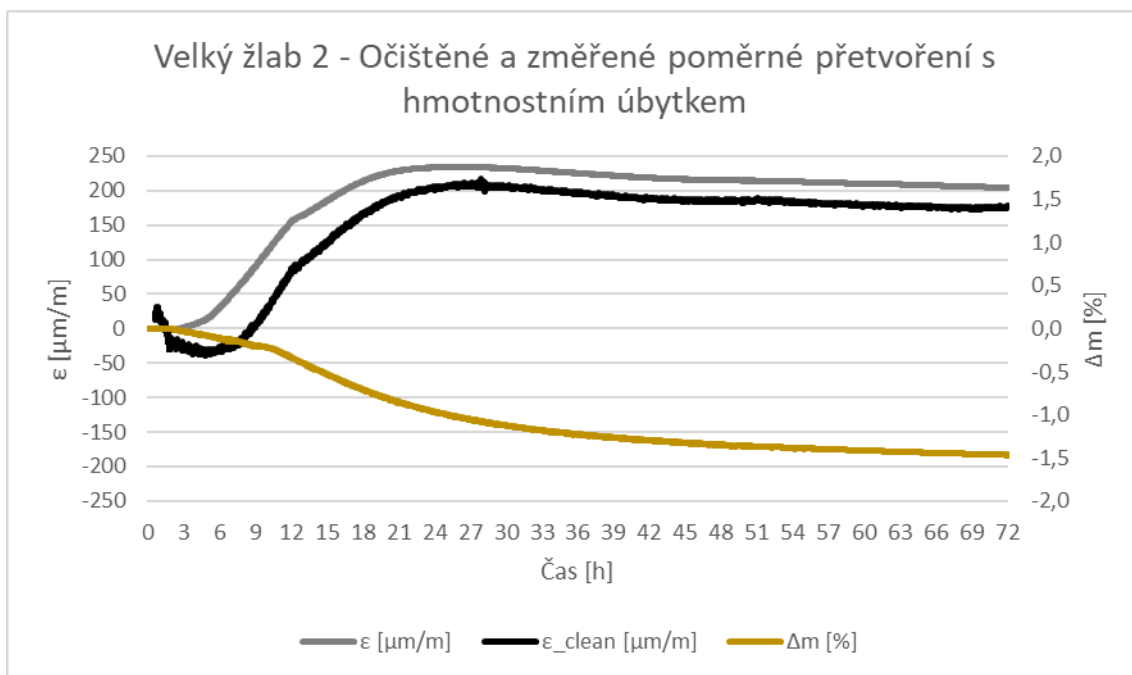
10.1 VŠECHNY ŽLABY



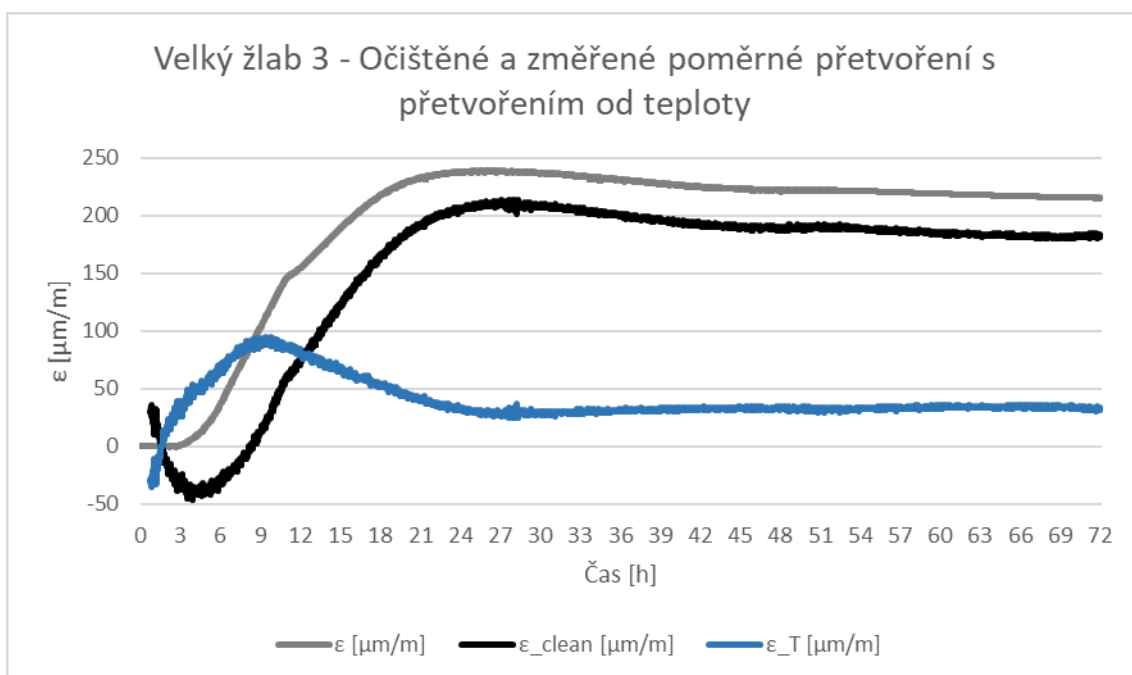
10.2 VELKÝ ŽLAB 2

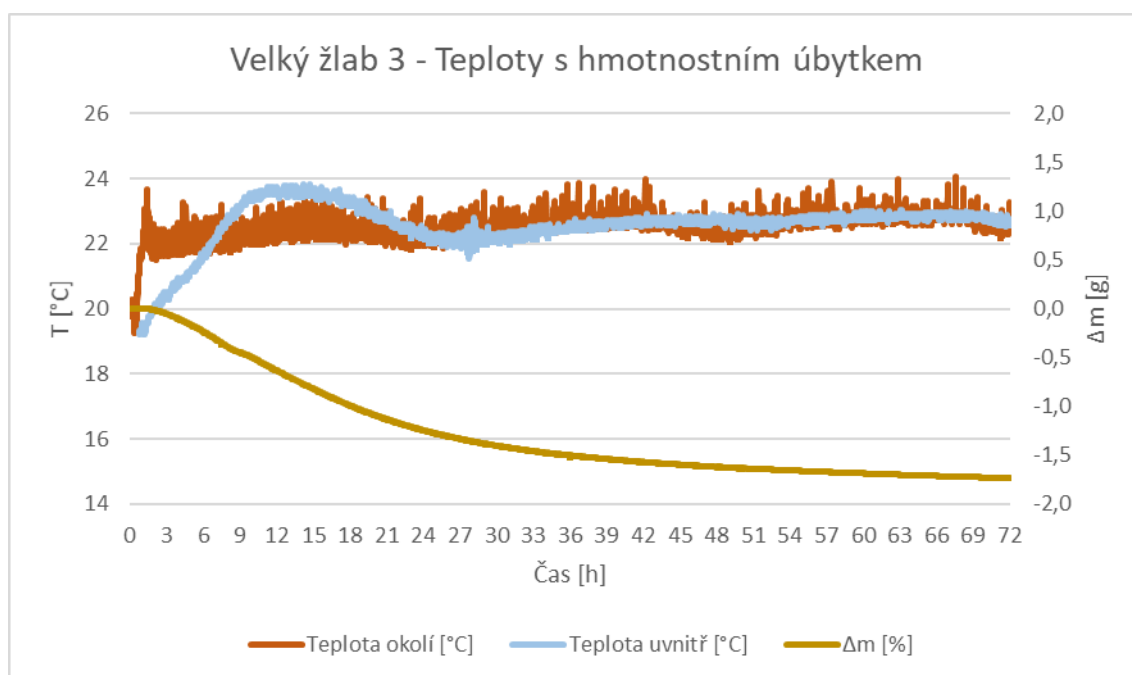
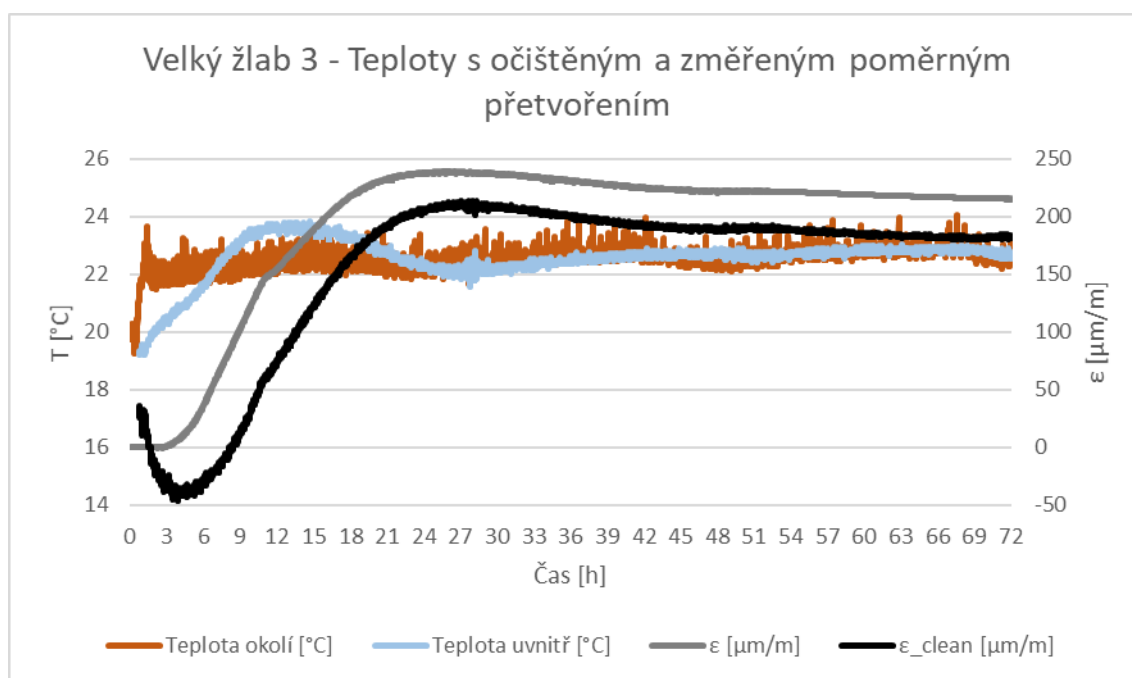


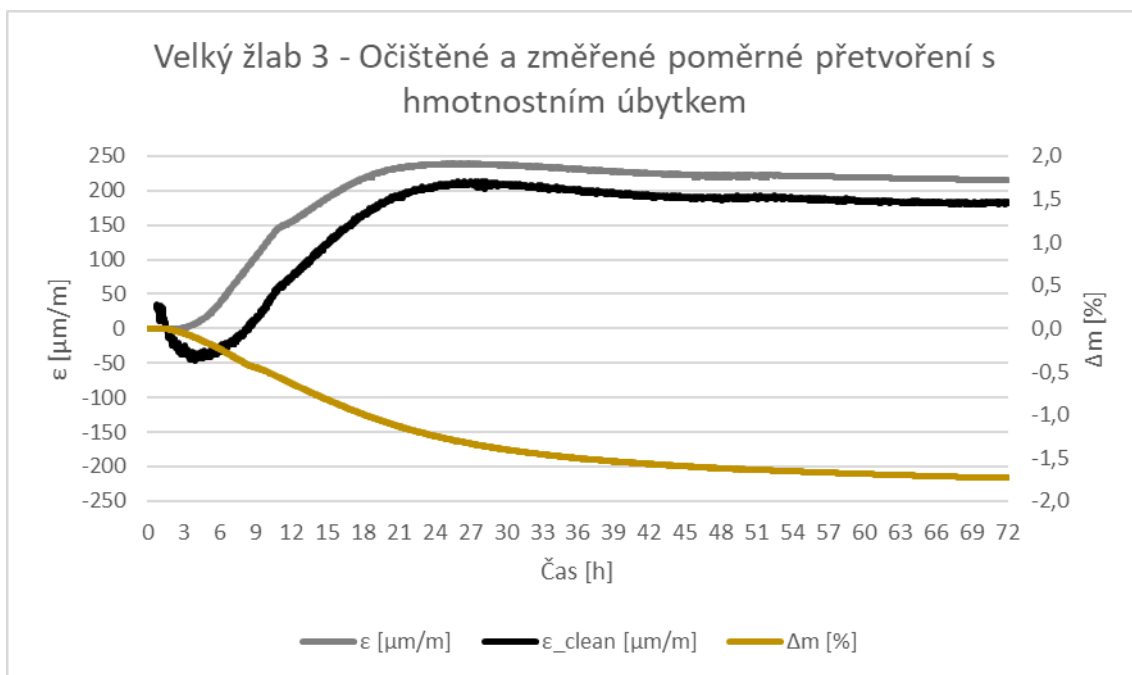




10.3 VELKÝ ŽLAB 3







10.4 MALÉ ŽLABY

